EDITORIAL

Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Warum ist al-Biruni interessant? Der orientalische Universalgelehrte des 11. Jahrhunderts zeigt – vielleicht in noch höherem Maße als sein bekannterer Zeitgenosse und Briefpartner Avicenna –, wie ein aufgeklärter Geist mit Mystik und Aberglauben seiner Zeit, etwa in Medizin und Astronomie, aufräumen kann. Im Westen wurde al-Biruni erst ab der Mitte des 19. Jahrhunderts bekannt, als vor allem Alexander von Humboldt auf den arabischen Gelehrten hinwies. Solche – manchmal vergessenen – Gestalten der Wissenschaftsgeschichte möchten wir Ihnen immer wieder nahe bringen. Denn an ihnen wird klar, dass späteren Wissenschaftlern Entdeckungen oft nur gelangen, weil sie, wie Newton es für sich formulierte, „auf den Schultern von Riesen standen" (Seite 74).

Warum ist das Knie der roten chilenischen Vogelspinne von Bedeutung? Weil es nach einem Prinzip funktioniert, mit dem eine neue Generation von Handprothesen betrieben werden kann.

Nicht durch Anspannung von Muskeln, die mehrere Knochen umspannen, bewegt sich das Tier. Die Spinne *Grammostola spalulata* streckt ihre Kniegelenke, indem sie Körperflüssigkeit in einen Hohlraum presst. Das ist selbst in der Tierwelt ungewöhnlich. Doch in der Medizintechnik eröffnet es ganz neue Perspektiven. Wissenschaftler des Forschungszentrums Karlsruhe benutzen diesen Trick der Natur, um etwa Handprothesen zu schaffen, die vielen der 27000 so behinderten Menschen in Deutschland helfen könnten.



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE; BLICKWINKEL

Karlsruher Roboterspinne „Black Spider" und ihr Vorbild (unten)

Der Trick: In elastische Hohlräume von Kunststofffingern wird beispielsweise Luft eingeblasen. Drucksensoren und Mikroelektronik steuern die weiche Kunsthand. Sie hat Eigenschaften, die einer natürlichen Hand näher kommen als Vorläufermodelle, bei bisher unerreicht geringem Gewicht (Seite 60).

Mit dieser Ausgabe beginnen wir drei neue Rubriken, damit „Spektrum" für Sie noch informativer und interessanter wird:

➤ „Wissenschaft in Unternehmen" liefert Einblicke, wie (oft junge) Firmen geniale und nützliche Ideen in die ökonomische Wirklichkeit umsetzen. Auf Seite 114 starten wir mit einem Portrait der vor drei Jahren gegründeten Freiburger Firma BioTissue, die unter anderem eine neue Generation von Hautersatz aus körpereigenen Zellen herstellt.

➤ „Wissenschaft im Internet" gibt Ihnen Tipps und Hinweise auf Websites zu spannenden Themen aus dem Forschungsbereich (Seite 109).

➤ „Ausgezeichnet" berichtet über ausgewählte Arbeiten, für die Wissenschaftler mit Preisen bedacht wurden. (Seite 96).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

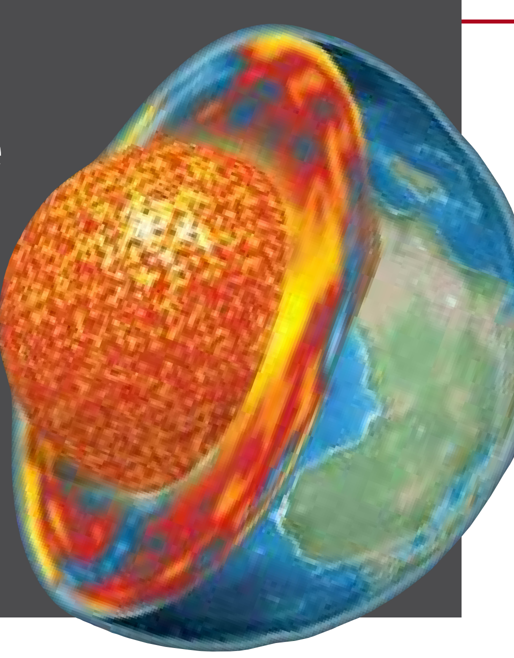
INHALT

TITELBILD:
Die Erde als halbierte Frucht: Im Mantel um den Kern wechseln heiße aufsteigende Zonen (rot) mit kalten absinkenden (blau).
Grafik: Slim Films

TITELTHEMA: GEOPHYSIK

Die verbeulte Erde

Seite 28



Von Michael Gurnis

Nicht nur die Plattentektonik gestaltet die Erdkruste. Gesteinsströme im Erdmantel heben und senken ganze Kontinente, ohne dass Krustenplatten miteinander kollidieren. Gewaltige Plateaus entstehen so – wie im südlichen Afrika.

EVOLUTION

Wenn die Evolution sich wiederholt

Seite 36

Von Jonathan B. Losos

Die Großen Antillen wimmeln von verschiedensten Echsen der Gattung Anolis. Erstaunlicherweise wohnen auf allen Inseln des Archipels ähnliche Typen. Und doch entstanden diese Arten unabhängig voneinander. Offenbar hat die Evolution hier immer wieder gleiche Wege eingeschlagen.



ASTROPHYSIK

Gravitationslinsen

Seite 44

Von Joachim Wambsganß

Kompakte Himmelskörper können ähnlich wie eine Glaslinse das Licht noch weiter entfernter Objekte ablenken. Dieser so genannte Gravitationslinseneffekt liefert Aufschlüsse über die dunkle Materie, die Struktur der Quasare und die großräumige Massenverteilung im Universum.

ZELLBIOLOGIE

Reißwolf für Proteine

Seite 54

Von Alfred L. Goldberg, Stephen J. Elledge und J. Wade Harper

Im Inneren von Zellen zerlegen so genannte Proteasomen unerwünschte Proteine. Die medizinische und pharmazeutische Forschung nutzt diesen Vorgang als eine Fundgrube, etwa zur Bekämpfung von Krebs oder Aids.



PROTHETIK

Druckluft in den Fingern

Seite 60

Von Stefan Schulz, Christian Pylatiuk und Georg Bretthauer

Heutige Handprothesen sind meist schwer und unbequem. Mit so genannter Fluidaktorik und einer intelligenten Steuerung bauten Karlsruher Wissenschaftler nun eine künstliche Hand, die dem natürlichen Vorbild deutlich näher kommt.





BIOARCHÄOLOGIE

Die Indianer von La Florida

Seite 68

Von Clark Spencer Larsen

Nach Ankunft der Europäer dezimierten nicht nur Seuchen, Krieg und Ausbeutung die Ureinwohner Amerikas. Neue bioarchäologische Untersuchungen in der Kolonie La Florida belegen, dass auch ein drastischer Ernährungswandel die Gesundheit der Indianer untergrub.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Al-Biruni – ein Gelehrter, den das Abendland übersah

Seite 74

Von Gotthard Strohmaier

Welch hohen Stand die Wissenschaft im Orient schon im Mittelalter erreichte, ist bei uns kaum bekannt. Insbesondere der Universalgelehrte al-Biruni gelangte zu Erkenntnissen, die im Abendland erst Jahrhunderte nach ihm gewonnen wurden.

Automobiltechnik:

Zwölf Zylinder und eine Thermosflasche

Seite 82

Die Bayerischen Motorenwerke setzen auf einen Verbrennungsmotor, der Wasserstoff und Benzin gleichermaßen gut verdaut. Der besondere Clou: Eine Brennstoffzelle ersetzt die Lichtmaschine.

Außerdem:

- Digitalpianos
- Neuronale Netze beim Spritzgießen

Technogramm:
Holzschutz • Filter für Industrieabwässer • Halbleiter-Nanoröhren



FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

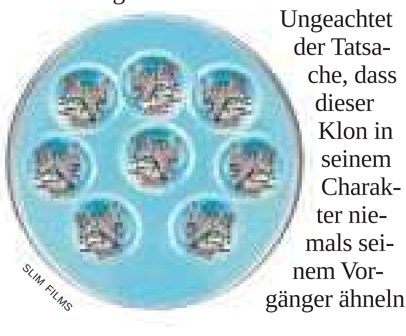
WEITERE RUBRIKEN

Klonen bedrohter Tiere – Die neue Arche Noah

Januar 2001

Merkwürdiges Projekt

Ich dachte an einen verfrühten Aprilscherz, als ich das las. Was im Schwarzenegger-Film „Der sechste Tag" noch als Utopie dargestellt wird, droht in Amerika rasch Wirklichkeit zu werden: Ein Unternehmen bietet an, verstorbene und geliebte Haustiere zu klonen. Ungeachtet der Tatsache, dass dieser Klon in seinem Charakter niemals seinem Vorgänger ähneln kann, teilt er doch nicht die gleichen Erfahrungen, sind offenbar trotzdem genügend Interessenten für dieses merkwürdige Projekt vorhanden, während gleichzeitig in unseren Tierheimen Tausende von abgeliebten Haustieren vegetieren.


SLIM FILMS

Daniel Körtel, Kassel

Ganze Mühe umsonst

Die Hoffnung, mittels Klonierung bedrohte Tierarten zu erhalten, ignoriert in weiten Teilen das aktuelle Wissen über Mikroevolution und Populationsbiologie. Eine Tierart ist kein starres Individuum, sondern in Kontakt mit seiner Umwelt stets Änderungen unterworfen, z. B. im evolutiven Wettlauf mit natürlichen Feinden.

Um auf diese Anforderungen reagieren zu können, muss ein Mindestmaß an genetischer Vielfalt vorhanden sein. Ist diese erloschen, kann man eine Art als ausgestorben betrachten, auch wenn noch lebende Individuen existieren. Die mikroevolutive Änderung kann auch bei Wirbeltieren innerhalb weniger Jahre starke Veränderungen hervorrufen – Beispiel Darwinfinken. Würden geklonte Darwinfinken zu einem Zeitpunkt ausgewildert, an dem das Nahrungsangebot nicht mit der Schnabelform korrespondiert, wäre die ganze Mühe umsonst.

Dr. Jens Rolff, Sheffield

Mangel an Ehrfurcht

Was ich hier las, ließ mir beinahe die Haare zu Berge stehen. Der Mensch hat sich jahrzehntelang völlig hochmütig und rücksichtslos der Natur gegenüber verhalten und dabei viel Schaden angerichtet. Und jetzt, wo wir durch den Erhalt von Lebensräumen und den Verzicht auf weitere Schädigungen alles tun sollten, um der Natur die Möglichkeit zu geben, sich selbst zu heilen, da gehen wir mit genau dem gleichen Mangel an Ehrfurcht vor Tier und Natur an die Sache heran und zwingen völlig widernatürlich Tiere dazu, künstlich erzeugte Embryos anderer Spezies auszutragen.

Daniel Keßler, Oldenburg

Zahnmedizin

Januar 2001

Kieferorthopädie hat zentrale Stellung

Ästhetische Zahnheilkunde ist ohne Kieferorthopädie nicht möglich. Im vorgestellten Fall der Sängerin Cher erfolgte sicher eine kombinierte kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung. Das Hollywood-Lächeln für jedermann ist bestimmt machbar, aber nur mit Hilfe einer kieferorthopädischen Behandlung.

Komplexe Fälle in der Kieferchirurgie, Parodontologie oder Prothetik sind ohne Kieferorthopädie nicht zufriedenstellend lösbar. In den meisten Fällen ist der Kieferorthopäde der erste Ansprechpartner der Patienten und übernimmt somit die Leitfunktion im Team.

Jede ausgeprägte Kiefergelenkserkrankung, deren Ursache sehr oft in Okklusionsstörungen liegt, kann nur mit einer kombinierten kieferorthopädischen Behandlung erfolgen. Jede Sprachstörung wird beim Kieferorthopäden landen, der mit einer Logopädin eng zusammenarbeitet.

Prof. Dr. R. Permann, Graz

Parodontitis – Das schleichende Übel

Der Autor beschränkt seine Beschreibung von Ätiologie und Verlauf der Parodontitis auf die so genannte „langsam fortschreitende Parodontitis". Die angesprochenen Zahnverluste im mittleren Alter sind jedoch meistens die Folge einer „rasch fortschreitenden Parodontitis". Diese aggressivere Form führt schon in jüngeren Jahren zu Taschenbildungen und Zahnlockerungen. Als verantwortlich dafür wird eine temporär verminderte Abwehrfähigkeit angesehen, wie sie nicht selten bei unzulänglicher Stressbewältigung gegeben ist.

Bei vielen Menschen werden Stress-Situationen wie z.B. schlafverkürzende Lebensweisen oder Arbeitsüberlastung von starken Zahnfleischentzündungen begleitet. Vermehrung von Entzündungsmediatoren am Zahnfleisch unter psycho-sozialem Stress konnte auch bei guter Mundhygiene nachgewiesen werden. Aber auch eine genetische Komponente wird angenommen.

Dr. Wolfgang Hoppenstedt, Braunschweig

Essbare Impfstoffe

Januar 2001

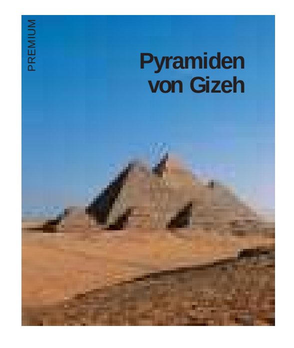
Der Artikel verdeutlicht, vor welchen Problemen der moderne Mensch bei der Bekämpfung von Infektionskrankheiten und den damit verbundenen Seuchen resp. Epidemien steht. Allein die Zahl der zwei Millionen Todesfälle unter Kindern jährlich ist Ausdruck dafür. Die Erzeugung „essbarer Impfstoffe", wie im Artikel beschrieben, würde zweifellos einen Durchbruch bei der Bekämpfung der Krankheiten bedeuten. Letztendlich würden davon nicht nur die Menschen in den ärmsten Regionen der Erde profitieren, sondern auch wir in den entwickelten Industrienationen würden eine Vereinfachung in der Erzeugung und Verabreichung von Impfstoffen erfahren.

Carsten Riedel, Eilsleben

Pyramidenbauer befragten die Sterne

Spektrogramm – Januar 2001

Hier fragt man sich: „Warum einfach, wenn es auch umständlich geht?" Im flachen Wüstenland mit freier Sicht bis zum Horizont brauchten die Ägypter nur den Winkel zwischen den Punkten für Sonnenauf- und -untergang desselben Tages zu halbieren und hatten so mit genügender Genauigkeit für ihre Bauplanung die Richtung zum Südpunkt am Horizont. Woher sollten die Ägypter auch gewusst haben, dass ihnen die besondere Sternenkonstellation einen exakten Nordpunkt beschert, wenn nicht durch Vergleich mit dem Lauf der Sonne?



PREMIUM

Die Änderung der Südrichtung von Pyramide zu Pyramide je nach Datum der Erbauung lässt sich vielleicht dadurch erklären, dass die geometrischen Rotationspole der Erde über deren Oberfläche wandern, weil auf Grund der Kontinentalverschiebung und Plattentektonik der irdische Schwerpunkt ständig seinen Ort ändert.

Hans Joachim Melsa, Hamburg

Wer waren die ersten Amerikaner? – Februar 2001

Relikte entfernen

Dieser Artikel verdeutlicht auf anschauliche Weise neue Forschungsansätze. Hat die Theorie von José de Acosta zur Erstbesiedlung Amerikas nun ausgedient?

Der spanische Jesuit, der noch über die Erde als Mittelpunkt des Universums schrieb und seine Theorie lediglich auf spanischer politischer Kartografie aufbaute, erfand seine Argumente ohnehin aus politischen Erwägungen (Gemegah 1999): Externer Ursprung aller Indianer – Ursprung in Asien – Rigorose Ablehnung von Überseekontakten – Späte Besiedlung Amerikas. Erst einmal müssen die Relikte religiöser und politischer Renaissance-Konzepte aus der Besiedlungsforschung entfernt werden.

Dr. H. Gemegah, Hamburg

Neue Denkansätze

Selbstverständlich sollte Wissenschaft objektiv sein und durch Funde die Annahmen beweisen. Mir drängt sich jedoch oft genug der Eindruck auf, dass persönliche Einstellungen und Weltanschauungen diese Beweise durch subjektive Interpretationen zunichte machen. Deshalb ist Ihr Artikel ein wichtiger Beitrag zur Anregung neuer Denkansätze. Ich kann nur hoffen, dass sich bestehende und weitere Kenntnisse und Forschungsergebnisse auch bis zu unseren Schulen durchsetzen. Hier sehe ich einen großen Nachholbedarf in der aktuellen Fortbildung der Lehrer.

Evelyn Bodenstein, Olfen



PAMELA PATRICK

Jagten die Uramerikaner Fische?

Hydraulische Bremsen

Wissenschaft im Alltag – Februar 2001

Erklärung für Vorschulkinder

Die Erklärung der hydraulischen Bremse ist für Vorschulkinder gut geeignet. Ich frage mich allerdings, ob man am Bremspedal ziehen muss, um die Außenluft wieder aus dem Bremskraftverstärker herauszubekommen. Mehr Tiefgang bitte.

Günther Herbold, Bochum

Funktion nicht erkennbar

Dieser Beitrag wird nicht dem Anspruch gerecht, der dem „Spektrum“ angemessen ist. Die grundsätzlichen Angaben entsprechen dem Niveau einer Jugendzeitschrift. Da hier aber der Bremskraftverstärker angesprochen wird, sollte etwas präziser darauf eingegangen werden. Als „Kolben“ werden hier die Kolbenstangen angegeben. Welche Teile fest und welche beweglich sind, ist nicht zu erkennen und damit wird die Funktion nicht klar. Es wird nicht erklärt, woher der Unterdruck kommt, und es ist nicht ersichtlich, wie vom Unterdruck auf atmosphärischen Druck umgeschaltet wird. Zwei Bilder vom Unterdruckverstärker (einmal im Ruhezustand und einmal mit getretenem Pedal) hätten das Ganze gut verdeutlichen können.

Prof. Dr.-Ing. H. Steinecke, Leonberg

Errata

Ichthyosaurier – März 2001

Die Tinte für Kalligrafien lieferte nicht der schwarze Schiefer von Honshu. Mit geeigneter Vertiefung wurde er verwendet, um darin die Tusche mit Wasser anzureiben. Der Tuschestein für japanische Kalligrafien besteht aus Ruß und Leim.

Heiße Strahlung eines Schneeballs

Monatsspektrum – März 2001

Bei der Wärmestrahlung von Körpern liegt nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz das Maximum für den Menschen mit $T = 273 + 37 = 310$ K bei 9,3 µm.

Die Redaktion

Film „Das Experiment“

Rezensionen – März 2001

Der Psychologe, der das Original-Experiment durchführte, heißt Philip Zimbardo; er ist nach wie vor Professor in Stanford und designierter Präsident der American Psychological Association (www.zimbardo.com). Das Experiment ist in die Geschichte der Psychologie als das „Stanford Prison Experiment“ (www.prisonexp.org) eingegangen, jedoch brach man es rechtzeitig ab.

Adj. Prof. S. Geyerhofer, Wien

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels,
Postfach 104840,
69038 Heidelberg
E-Mail:
wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 504-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Olaf Fritsche, Dr. Susanne Lipps, Claus M. Schmidt, Dr. Frank Scholz
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 12,90/sfr 12,90/öS 98,–; im Abonnement DM 142,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 123,60. Die Preise beinhalten DM 10,80 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 10,20 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (06221) 504-748, Fax -758; Verkaufsberatung: Sabine Ebert, Tel. (06221) 504-749, Fax -758; verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Michael Albrecht, Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

VERHALTENSFORSCHUNG

Berechenbare Panik

Verschiedene physikalische Modelle erlauben inzwischen, das Verhalten von Menschenmassen in Katastrophenfällen vorherzusagen. Damit können sie helfen, Fluchtwege zu optimieren und so die Anzahl tragischer Unfälle zu senken.

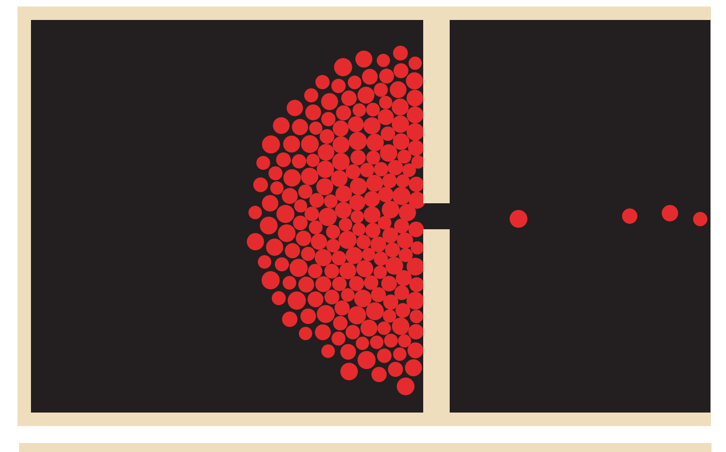
Von Gerhard Weinreich

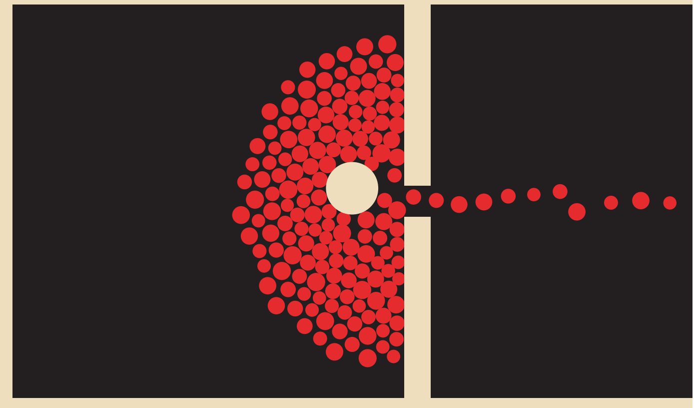
Die Verhaltensforschung musste sich lange damit begnügen, soziale Systeme aus psychologischer oder soziologischer Sicht rein qualitativ zu beschreiben. Zwar existieren schon seit einiger Zeit mathematische Modelle, die auch quantitative Aussagen liefern. Doch kranken sie daran, dass sie die Interaktionen der Menschen nicht realistisch wiedergeben. So berücksichtigen sie beispielsweise bei flüchtenden Menschenmassen nur die Beschaffenheit der Fluchtwege und bemühen eine Analogie von Fußgängerströmen zu Flüssigkeiten oder Gasen. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, wie viele Menschen in welcher Zeit abfließen können. Dementsprechend tauchen in den Gleichungen Größen aus der Hydrodynamik wie die Viskosität und die Reynoldszahl auf – individuelles Verhalten hingegen wird nicht in Betracht gezogen.

In jüngster Zeit hat sich dies nun geändert: Neuere, verfeinerte Modelle beziehen auch psychologische Faktoren ein. Dabei sind im Wesentlichen zwei Ansätze zu unterscheiden. Die einen Modelle greifen auf klassische Bewegungsgleichungen zurück, die über geeignete Parameter an die jeweilige Situation angepasst und mit aufwendigen Näherungsverfahren per Computer gelöst werden. Die anderen nutzen Methoden, die in der Mathematik und Physik erst seit etwa zwei Jahrzehnten eine Rolle spielen; dazu zählt beispielsweise das Konzept des zellulären Automaten. Beide Ansätze profitieren von der rapide gestiegenen Computerleistung, dank der sich heute problemlos numerische Berechnungen durchführen lassen, die noch vor zehn Jahren allenfalls teure Supercomputer zu bewältigen vermochten.

Klassische Bewegungsgleichungen benutzt eine deutsch-ungarische Gruppe um den Physiker Dirk Helbing aus Dresden. Sie interessiert sich für die Frage, wie sich Menschenmassen verhalten, die vor einem Feuer aus einem Raum fliehen. Dazu haben die Forscher ein Modell ersonnen, das der Viel-Teilchen-Physik entlehnt ist. Es beruht auf einer Mischung aus physikalischen und psychologischen Parametern.

Menschen neigen dazu, einen gewissen Abstand zu Personen in der Umgebung zu halten. Dies lässt sich als abstoßende Kraft psychologischen Ursprungs deuten. Wenn Menschen einander berühren, treten zwei weitere abstoßende Kräfte auf, die das Fortkommen verlangsamen: eine Reibungskraft und eine so genannte Körperkraft, die dem Druck der anderen Personen entgegenwirkt.





Die Computersimulation der panischen Flucht aus einem Raum ergab, dass es immer wieder zu Stockungen kommt, weil sich die Menschen (rote Punkte) vor der Tür zu einer Rundbogen-artigen Konstellation zusammenballen, aus der sich der Einzelne nur mühsam befreien kann (oben). Paradoxerweise vermindert eine Säule vor dem Ausgang diesen Effekt und sorgt so für einen gleichmäßigeren Ausstrom (unten).

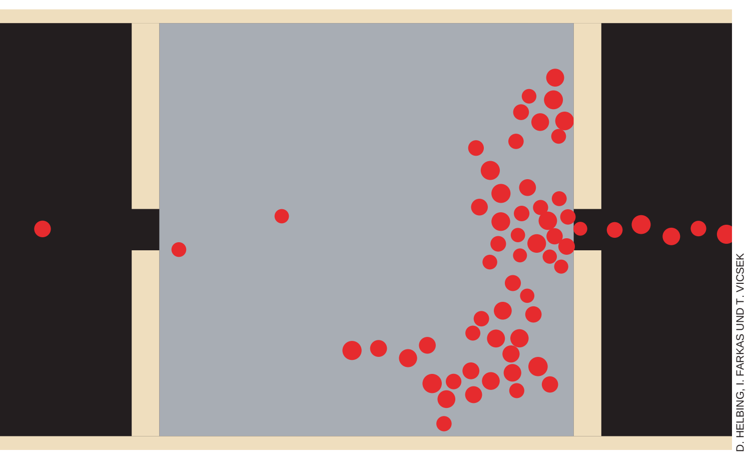
D. HELBING, I. FARKAS UND T. VICSEK

Flucht vor dem Feuer

In ihren ersten Simulationen untersuchten Helbing und seine Kollegen das Hinausströmen einer Menschenmenge aus einem quadratischen Raum mit 15 Metern Seitenlänge und einer einen Meter breiten Tür. Unter normalen Umständen, wenn beispielsweise eine Veranstaltung zu Ende ist und kein Grund zur Eile besteht, bildet sich vor dem Ausgang eine lockere Traube, in der die Menschen mit einer Geschwindigkeit von rund einem Meter pro Sekunde vorankommen. Wie die Simulationen ergaben, lässt sich diese Geschwindigkeit auf etwa 1,5 Meter pro Sekunde steigern, wenn es die Personen eilig haben und zügig hinausstreben. Unter dieser Bedingung entleert sich der Raum am schnellsten.

Tritt jedoch eine Gefahr auf, drängen die Menschen wesentlich ungestümer hinaus. Sie fangen daher an, zu drücken und zu stoßen. Das erzeugt Körper- und Reibungskräfte, durch die sich die Bewegung verlangsamt. Bei Aufkommen von Panik nehmen Drängeln und Stoßen schließlich derart zu, dass Menschen zu Boden fallen und zu Hindernissen werden: Die reale Geschwindigkeit sinkt noch weiter. Der Versuch, sich schneller fortzubewegen, führt also letztendlich dazu, dass sich der Raum langsamer entleert und sich weniger Menschen retten können, als wenn sich die Masse besonnen fortbewegt hätte.

Diese Erfahrung vermochte das Modell sehr gut zu reproduzieren. Es zeigte



In Panik entwickeln Menschen oft einen fatalen Herdentrieb: Jeder folgt dem Gros der anderen. Dies kann bei schlechter Sicht – etwa durch Rauchentwicklung – dazu führen, dass von zwei vorhandenen Ausgängen praktisch nur einer benutzt wird. Auch dieser Effekt ließ sich im Computermodell nachvollziehen.

D. HELBING, I. FARKAS UND T. VICSEK

insbesondere einen wichtigen Grund für die auftretenden Stockungen: Unter dem Ansturm nachdrängender Massen bildet sich vor dem Ausgang immer wieder eine Blockade, weil die Menschen dort zu einer Art Rundbogen zusammengeschoben werden, aus dem sich der Einzelne nur mühsam lösen kann. Hier offenbarte die Simulation sogar einen paradoxen Ausweg, der im Ernstfall Leben retten könnte: Säulen, die in unregelmäßigen Abständen vor dem Ausgang angebracht wurden, verhinderten die Blockaden sehr effizient und sorgten so auch unter Panikbedingungen für einen gleichmäßigeren und schnelleren Ausstrom der Menschenmassen.

In einer weiteren Serie von Simulationen untersuchten Helbing und seine Kollegen, wie sich das Fluchtverhalten ändert, wenn der Raum zwei Türen hat. Bei einem Feuer kann dichter Rauch die Sicht stark einschränken, sodass die Menschen unter Umständen nicht wissen, ob es nur einen oder mehrere Ausgänge gibt und wo diese sich befinden. Bei Panik dominiert dann der „Herdentrieb“: Jeder vertraut darauf, dass schon irgendjemand dabei sein werde, der sich zurechtfindet. Deshalb laufen die meisten ihren Nachbarn hinterher. Hat dann jemand einen Ausgang gefunden, stellen die andern die Suche ein und folgen dem vermeintlichen Retter; der zweite Ausgang, durch den viele entkommen könnten, bleibt unbenutzt.

Auch den Herdentrieb konnten die Wissenschaftler als Parameter in ihr Modell einbauen und in der Stärke variieren. Wie die Simulationen zeigten, ist er in gewissem Ausmaß durchaus sinnvoll. Nur wenn er überhand nimmt, wird er zur Falle; ansonsten sorgt er dafür, dass viele Menschen von der Entdeckung Einzelner profitieren.

Einen neueren Ansatz zur quantitativen Beschreibung eines sozialen Systems verfolgen der Physiker Michael Schreckenberg und seine Mitarbeiter von der Universität Duisburg. Sie haben sich der Evakuierung von Fährpassagieren bei Seenot angenommen. Dabei beschreiben sie die Bewegungen der Flüchtenden mit einem so genannten zellulären Automaten. Dahinter verbirgt sich die Idee, dass es zuweilen genügt, ein System auf wenige Eigenschaften zu reduzieren, wenn man seine Entwicklung vorhersagen will. In diesem Sinne verzichtet der zelluläre Automat auf komplizierte Mathematik: Das System reduziert sich auf ein einfaches Brettspiel mit leicht nachvollziehbaren Regeln.

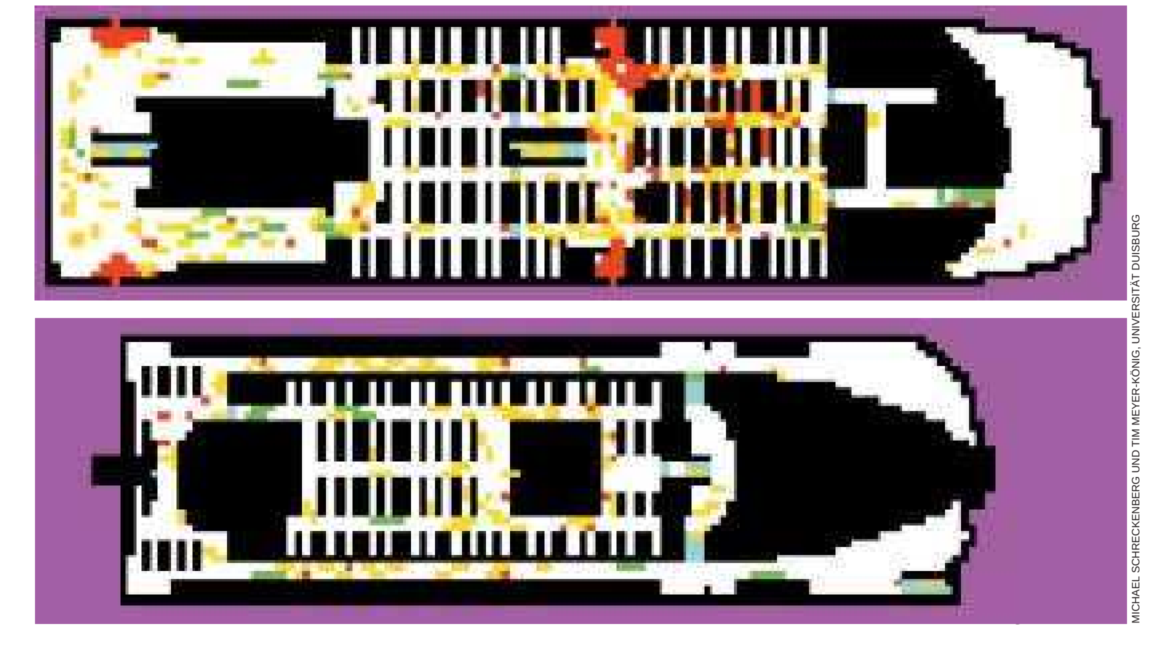
Das Duisburger Modell unterteilt die Kabinengänge in quadratische Zellen mit einer Kantenlänge von vierzig Zentimetern; dies entspricht dem mittleren Platzbedarf eines Menschen. In jeder Zelle kann sich höchstens ein Passagier befinden, und die maximal erreichbare Geschwindigkeit beträgt fünf Zellen pro Sekunde; auf Grund des Alters oder des Gesundheitszustandes kann sie für eine einzelne Person auch niedriger liegen.

Wie bei einem gewöhnlichen Brettspiel bewegen sich die Passagiere nicht alle gleichzeitig, sondern nacheinander – allerdings mit der Besonderheit, dass die Reihenfolge der zu ziehenden Passagiere vor jeder neuen Runde nach einem Zufallsverfahren bestimmt wird. Von Zeit zu Zeit bleiben flüchtende Menschen unvermittelt stehen, um sich für einen kurzen Augenblick zu orientieren. Der zelluläre Automat berücksichtigt dieses Verhalten, indem er die Passagiere mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zum Halten veranlasst. Desgleichen trägt er der Tatsache Rechnung, dass Menschen in Panik oft ziellos hin und her laufen: Die Passagiere wechseln in der Simulation mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit während des Laufens abrupt ihre Richtung.

Trifft ein flüchtender Mensch auf eine Schlange, macht er im Allgemeinen nach einer kleinen Weile wieder kehrt, ohne nüchtern abzuwägen, ob vielleicht das Einreihen und Warten dem neuerlichen Suchen eines Fluchtweges vorzuziehen ist. Der zelluläre Automat imitiert auch dieses Verhalten, indem er die Passagiere nach einer definierten Verweildauer ihr Heil wieder in der entgegengesetzten Richtung suchen lässt.

Wie schnell man ins Rettungsboot gelangt, hängt auch davon ab, ob entspre- ▶

Die Notfallevakuierung einer Fähre mit zwei Decks ließ sich mit einem zellulären Automaten simulieren. Das Schiff wurde in 40 mal 40 Zentimeter große Zellen unterteilt, die etwa dem Platzbedarf eines Menschen entsprechen. Unzugängliche Bereiche sind schwarz, Flaschenhälse wie Treppen und Türen graublau dargestellt. Rote Kästchen symbolisieren stehende, gelbe langsam gehende und grüne schnell laufende Menschen. Das untere Deck (oben) hat vier Ausgänge, auf beiden Seiten je einen in der Mitte und am Heck.



MICHAEL SCHRECKENBERG UND TIM MEYER-KÖNIG, UNIVERSITÄT DUISBURG

chende Hinweisschilder gut zu sehen sind. Möglicherweise schränken Passagiere, die sich vor einem Fliehenden befinden, dessen Sicht ein, sodass er nicht mehr in der Lage ist, die Route weit im Voraus zu planen. Auch hier müssen individuelle Parameter in Betracht gezogen werden. Große Menschen haben einen besseren Überblick als kleine; und Kurzsichtige, die in der Aufregung ihre Brille in der Kabine vergessen haben, finden ihren Weg nur unter Mühen.

Bisher ist es den Duisburger Forschern bereits gelungen, die Ergebnisse von Katastrophenübungen zu reproduzieren; und sie sind zuversichtlich, bald Situationen simulieren zu können, die sich mit realistischen Katastrophenfällen vergleichen lassen. Gemäß einer Vorschrift der International Maritime Organization müssen die Fluchtwege auf einem Schiff so beschaffen sein, dass alle Passagiere binnen einer Stunde auf den Rettungsbooten sind. Ob diese Bedingung erfüllt ist, lässt sich mit dem Duisburger Modell gleichfalls ohne großen Aufwand überprüfen.

Simulationen wie die genannten werden helfen, die Sicherheit überall dort zu verbessern, wo sich Menschenmassen fortbewegen: nicht nur auf Schiffen, sondern auch in Hochhäusern und Fußballstadien oder auf Autobahnen. Für all diese Orte lassen sich anhand der Ergebnisse wissenschaftlicher Berechnungen sinnvolle Verhaltensregeln aufstellen – auf Straßen sind das beispielsweise Geschwindigkeitsvorgaben, die auf Grund der Simulationen den höchsten Verkehrsfluss erwarten lassen.

Aber das wirft gleich die nächste Frage auf: Was passiert, wenn die Teilnehmer des Systems die Prognose erfahren und gezielt darauf reagieren, indem sie ihre Pläne ändern, um besser an ihr Ziel zu gelangen? Dann trifft die Vorhersage nicht mehr zu. Auch solche Rückkopplungen müssen in künftige Modelle einfließen, wenn sie zuverlässige Aussagen liefern sollen.

Übrigens lässt sich das geschilderte Phänomen schon jetzt beobachten: Wenn der ADAC mitteilt, dass es an einem bestimmten Wochenende wegen der Schulferien zu unvermeidlichen Staus kommen wird, gelangen die Autofahrer zuweilen überraschend zügig an ihr Ziel: Viele Urlauber sind einfach zu Hause geblieben und treten ihre Reise erst später an. ■

Gerhard Weinreich *ist Diplom-Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Dortmund.*

ASTROPHYSIK

Kosmische Monster der Mittelklasse

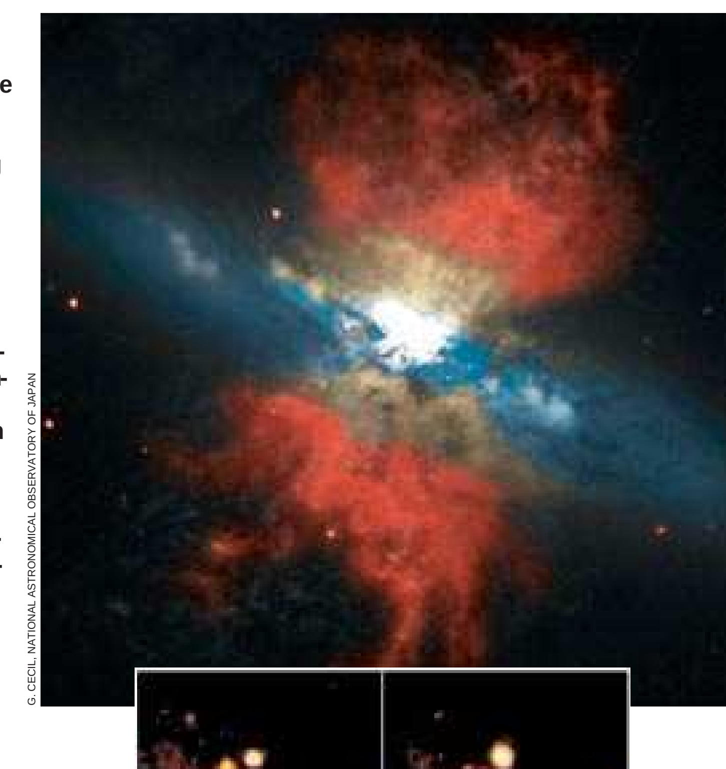
Außer den riesigen Mahlströmen in den Zentren aktiver Galaxien und den kleinen kosmischen „Staubsaugern“, die bei Sternexplosionen entstehen, könnte es nach Beobachtungen von Röntgensatelliten eine dritte Art Schwarzer Löcher geben.

Von Markus Pössel

Wird Masse auf genügend kleinem Raum zusammengedrängt, so sagt Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie die Entstehung eines Schwarzen Lochs voraus. Begrenzt wird es von einer besonderen Art Fläche, seinem so genannten Ereignishorizont; diese Grenze kann zwar von außen nach innen überquert werden, aus ihrem Inneren dagegen lassen enorme Gravitationskräfte weder Materie noch Licht entkommen.

Wer das erste Mal von Schwarzen Löchern hört, dürfte versucht sein, sie ob dieser extremen Eigenschaften ins Reich der Science-Fiction zu verweisen. Eine derart verzerrte Raumzeit stellt die Vorstellungskraft selbst dann auf eine harte Probe, wenn man sich mit den Grundlagen von Einsteins vierdimensionaler Weltbeschreibung vertraut gemacht hat. Und doch spricht eine Vielzahl von Forschungsergebnissen dafür, dass die gefräßigen Monster nicht bloß theoretische Konstrukte sind, sondern höchst reale Objekte, die das All in großer Zahl bevölkern (Spektrum der Wissenschaft 8/99, S. 26).

Theoretisch am besten verstanden sind die so genannten stellaren Schwarzen Löcher. In Sternen wie unserer Sonne halten sich der Strahlungsdruck der Kernfusionsprozesse und die Schwerkraft die Waage; ist der Kernbrennstoff verbraucht, kommt es zum Kollaps. Für



Die Starburst-Galaxie M82 (großes Bild) enthält Regionen rapider Sternbildung und eine Vielzahl dichter Sternhaufen. Wie Aufnahmen des Röntgensatelliten Chandra zeigen, befinden sich in ihrer Zentralregion mehrere intensive Röntgenquellen (kleine Bilder). Bei der hellsten nahe der Bildmitte könnte es sich um ein mittelschweres Schwarzes Loch handeln, da seine Helligkeit in nur drei Monaten (von der linken zur rechten Aufnahme) deutlich zugenommen hat.

G. CECIL, NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN

NASA, SAO, CXC

genügend schwere Sterne, das ergaben entsprechende Rechnungen, sollte das Endstadium des Zusammenbruchs, der in diesem Falle als kurzzeitig aufflammende Supernova sichtbar wird, ein Schwarzes Loch sein. Obwohl solche Sterne anfangs erheblich schwerer sein können als die Sonne, stoßen sie beim Kollabieren einen großen Teil ihrer Materie ab; stellare Schwarzer Löcher enthalten deshalb typischerweise nur zwischen drei und einigen Dutzend Sonnenmassen.

Sehr viel größere Schwarzer Löcher vermuten die Astrophysiker dagegen in Quasaren und Kernen aktiver Galaxien. Nur sie können die exorbitanten Mengen an Strahlungsenergie erklären, die solche Objekte auf verhältnismäßig kleinem Raum freisetzen. Dazu muss ihre Masse allerdings diejenige der Sonne um das Millionen- oder sogar Milliardenfache übersteigen.

Schwergewichts-Champions

Diese riesigen Schwarzen Löcher befinden sich im Inneren von Gaswolken. Deren Gas strömt, der Schwereanziehung folgend, auf sie zu und bildet wie Wasser, das aus der Badewanne abströmt, einen Wirbel – Astronomen sprechen von Akkretionsscheibe – um das Loch herum. Dabei erwärmt sich die einfallende Materie durch innere Reibung und gibt elektromagnetische Strahlung ab, die wegen der hohen Temperaturen von vielen Millionen Grad überwiegend im hochenergetischen Röntgenbereich liegt. Mögen Schwarze Löcher auch selbst nicht das geringste Licht abstrahlen – in Kombination mit Gaswolken können sie einige der hellsten Strahlungsquellen im All bilden.

Untersuchungen der Kernregion der Milchstraße legen nahe, dass sich auch dort ein gigantischer kosmischer Staubschlucker verbirgt. Demnach scheinen supermassive Schwarze Löcher nicht nur in aktiven Sternsystemen, sondern auch in ruhigeren wie dem unsrigen vorzukommen. Astrophysiker gehen mittlerweile davon aus, dass sie in Galaxienkernen die Regel und nicht die Ausnahme sind.

Allerdings ist bei supermassiven Schwarzen Löchern – anders als bei ihren kleinen stellaren Verwandten – noch weitgehend unklar, wie sie entstehen. In Frage kommen der Kollaps von Gaswolken oder von Sternhaufen in der Zentralregion der Galaxie, die Verschmelzung stellarer Schwarzer Löcher oder das stetige Anwachsen eines einzigen solchen Minimonsters, indem es sich mehr und mehr umgebende Materie einverleibt.

In jüngster Zeit nun haben Beobachtungen mit Hilfe von Röntgensatelli- ▶

ten Hinweise auf noch eine dritte Klasse Schwarzer Löcher erbracht – mittelschwere Exemplare mit einigen hundert bis zu einer Million Sonnenmassen. Sie bilden eine Art Bindeglied zwischen den beiden genannten Extremen. Derzeit bester Kandidat ist ein Objekt in der Galaxie M82 im Sternbild Großer Bär, zehn Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt.

Das Interesse an ihm weckten Beobachtungen mit dem 1993 gestarteten japanischen „Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics" (ASCA). Sie zeigten, dass ein kompaktes Objekt im oder nahe dem Zentrum von M82 ungewöhnlich helle Röntgenstrahlung aussendet. Für seine enorme Leuchtkraft gibt es, genau besehen, nur zwei Erklärungen: Entweder handelt es sich um eine Supernova, also einen explodierenden Stern, oder um Gas, das auf eine kompakte Masse – vermutlich ein Schwarzes Loch – zufällt und dabei, wie oben erläutert, große Strahlungsmengen freisetzt.

Die Helligkeit des Objekts variiert teils über mehrere Monate, teils aber auch nur über einige Stunden, was für astronomische Verhältnisse ein extrem kurzer Zeitraum ist. Diese Intensitätsschwankungen passen schlecht zum Helligkeitsverlauf einer Supernova-Explosion. Die zweite Erklärung ist daher wesentlich naheliegender: Der Masseneinfall auf ein Schwarzes Loch fluktuiert und ruft so die beobachteten Helligkeitsänderungen hervor.

Eine Untergrenze für die Masse des kompakten Objektes ergibt sich aus seiner Helligkeit. Die beim Materie-Einfall erzeugte Strahlung übt auf das umgebende Gas Druck aus und wirkt so der anziehenden Gravitation entgegen. Aus der beobachteten Helligkeit lässt sich der Strahlungsdruck abschätzen und ausrechnen, wie schwer die anziehende Masse sein muss, damit das Gas trotz dieses Strahlungsdrucks weiter in das Gravitationspotenzial stürzt. Die ASCA-Beobachtungen ergaben eine Untergrenze von 500 Sonnenmassen, ließen allerdings offen, ob es sich vielleicht doch um ein supermassives Schwarzes Loch im Zentrum von M82 handelt, das eben einfach nur schwach leuchtet.

Weitergehende Aufschlüsse erhielten Philip Kaaret und Andrea Prestwich vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) sowie Hironori Matsumoto vom Center for Space Research des Massachusetts Institute of Technology und Kollegen mit Hilfe des US-amerikanischen Röntgensatelliten Chandra, der das Objekt in M82 zwischen September 1999 und Juni 2000 insgesamt dreißig Stunden lang beobachtet hat. Chandra kann am Röntgenhimmel Strukturen unterscheiden, die von der Erde aus gesehen nur rund 0,0002 Winkelgrad – weniger als eine Bogensekunde – auseinander liegen; das entspricht der Größe eines Markstücks in mehr als sechs Kilometern Entfernung.

Was ASCA noch als eine einzige Strahlungsquelle erschienen war, erwies sich so als eine Ansammlung von mehr als einem Dutzend Einzelquellen in und um die Zentralregion. Dominiert wird sie von einem mindestens 500 Sonnenmassen schweren Objekt veränderlicher Helligkeit. Dieses befindet sich allerdings zur großen Überraschung der Beobachter nicht im Zentrum der Galaxie.

Aus den Helligkeitsschwankungen lässt sich auf die Ausdehnung des Objekts schließen. Einerseits sollten nämlich an so gewaltigen Intensitätsänderungen weite Teile der Gasmassen in der Umgebung der Röntgenquelle beteiligt sein; andererseits aber kann sich die Wirkung eines jeden Mechanismus, der solche Änderungen hervorruft, höchstens mit Lichtgeschwindigkeit von einer Objektregion zur anderen ausbreiten. Multipliziert man die Lichtgeschwindigkeit mit der Dauer der beobachteten Veränderungen, erhält man daher eine Obergrenze für die Ausdehnung der beteiligten Raumregionen.

Nun konnte mit Chandra beobachtet werden, dass sich die Helligkeit des Objekts binnen drei Monaten versiebenfachte. Daraus errechnet sich eine maximale Ausdehnung von rund zwei Billionen Kilometern. Das ist für die dort versammelten mindestens 500 Sonnenmassen sehr wenig. So viel Materie auf derart engem Raum lässt sich nicht durch herkömmliche Objekte, etwa einen dichten Sternhaufen, erklären – ein deutlicher Hinweis auf ein Schwarzes Loch.

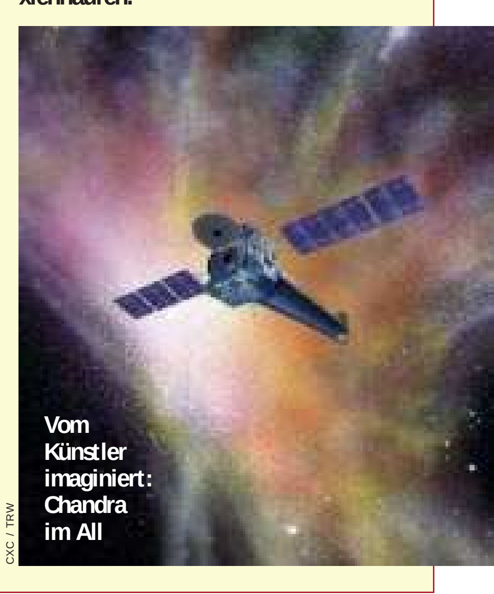
Da sich die variable Röntgenquelle außerhalb des Zentrums der Galaxie befindet, kann man schließlich auch eine Obergrenze für ihre Masse abschätzen. Jedes Objekt, welches das Zentrum einer Galaxie umläuft, gerät im Wechselspiel mit dessen Schwereanziehung und kleinen Schwerkraftstörungen durch die um-

Der Röntgensatellit Chandra

Kosmische Röntgenstrahlung wird von der Erdatmosphäre absorbiert und lässt sich daher nur mit Teleskopen im Weltraum nachweisen. Der Röntgensatellit Chandra, benannt nach dem indisch-amerikanischen Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar (1910—1995), umläuft die Erde seit Juli 1999 auf einer elliptischen Bahn in einem Abstand von bis zu 140 000 Kilometern.

Röntgenstrahlung ist so durchdringend, dass sie sich nur durch Reflexion an Spiegeln bündeln lässt, auf die sie in sehr flachem Winkel trifft. Eine entsprechende Anordnung von vier verschachtelten, röhrenartigen Spiegelflächen lenkt die von Chandra aufgefangene Strahlung in eine hochauflösende Kamera oder ein Spektrometer; mit zusätzlichen Beugungsgittern, die in den Strahlengang eingeführt werden können, lässt sich die Energie der Strahlung im Bereich zwischen 0,08 und 10 Kilo-Elektronenvolt (keV) mit einer Genauigkeit von wenigen Promille bestimmen (in der medizinischen Diagnostik wird Röntgenlicht mit Energien zwischen 20 und 150 keV verwendet). Die Aufnahmen mit der Kamera erreichen eine Auflösung von rund einer halben Bogensekunde.

Die wissenschaftlichen Ziele der Mission umfassen die Untersuchung der Überreste von Sternexplosionen sowie die Beobachtung von supermassiven Schwarzen Löchern und von heißen intergalaktischen Gaswolken in Galaxienhaufen.


Vom Künstler imaginiert: Chandra im All

CXC / TRW

Markus Pössel *promoviert am Albert-Einstein-Institut in Potsdam im Bereich Quantengravitation und Stringtheorie.*

 (Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

gebende Materie im Laufe der Zeit zwangsläufig in den Kern – je massereicher es ist, desto eher. Das Schwarze Loch in M82 konnte diesem Schicksal offenbar bislang entgehen. Ist es zusammen mit der Galaxie vor zehn Milliarden Jahren entstanden, so kann es daher höchstens 10 000 Sonnenmassen besitzen – damit wäre es eindeutig als mittelschwer einzustufen. Ist es dagegen erst eine Milliarde Jahre alt, hat es maximal eine Million Sonnenmassen. Dann wäre es zwar gerade so schwer wie die leichtesten supermassiven Monster, wiese aber die für ein solches Loch ungewöhnliche Besonderheit auf, nicht zusammen mit der Galaxie entstanden zu sein, in der es beheimatet ist.

Ergebnis einer Implosion oder Verschmelzung?

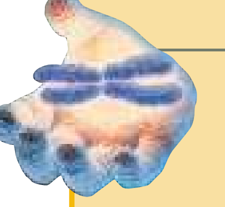
Die Entdeckung einer neuen Klasse von kosmischen Objekten ist für sich allein schon interessant. Bei den mittelschweren Schwarzen Löchern aber kommt hinzu, dass sie helfen könnten, den Ursprung ihrer supermassiven Verwandten zu klären. Auch sie besitzen zu viel Masse, als dass sie durch den Kollaps eines einzelnen herkömmlichen Sterns entstanden sein könnten. Stattdessen kommen ähnliche Prozesse in Frage, wie sie für die Entstehung supermassiver Löcher vorgeschlagen worden sind – etwa der Kollaps riesiger Gaswolken oder die Verschmelzung von Sternen und stellaren Schwarzen Löchern. In dieser Hinsicht könnte von Bedeutung sein, dass M82 eine „Starburst-Galaxie“ ist, die Regionen rapider Sternbildung und eine Vielzahl massiver Sternhaufen enthält.

Ohne weitere Informationen über die Häufigkeit und Verteilung mittelschwerer Schwarzer Löcher werden sich die Fragen nach ihrer Entstehung und ihrer Rolle im Universum kaum beantworten lassen. Deshalb geht die Suche nach ihnen weiter, während die bekannten Kandidaten noch gründlicher überprüft werden. So ist geplant, sie nicht nur weiterhin mit Chandra im Röntgenbereich, sondern auch im optischen und im Infrarotbereich des Spektrums zu beobachten; dadurch hofft man, genauere Informationen über die Eigenschaften der Akkretionsscheiben zu erhalten.

Auch die demnächst in Betrieb gehenden Gravitationswellendetektoren (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48) versprechen interessante Aufschlüsse. So würden bei der Verschmelzung kleiner oder mittelschwerer Schwarzer Löcher Gravitationswellen mit einer Frequenz von etwa zehn Hertz freige- ▶

setzt. Sie sollten mit den im Aufbau befindlichen erdgebundenen Detektoren wie dem US-amerikanischen LIGO nachweisbar sein. Das Einfangen eines mittelschweren Schwarzen Lochs durch ein supermassives würde dagegen ein Schwerkraftsignal bei einer tieferen Frequenz liefern. Es müsste sich mit dem Gravitationswellendetektor LISA aufspüren lassen, das 2010 im Weltraum stationiert werden soll. Solche Messungen könnten also viel dazu beitragen, Ursprung und Entstehungsmechanismus der mittelschweren und supermassiven kosmischen Monster endgültig zu klären. ■

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil VIII)



Anlässlich der Entzifferung des menschlichen Erbguts stellen wir beispielhaft zwölf darin codierte Proteine vor.

Hämoglobin

Farbstoff mit Feingefühl



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England).*

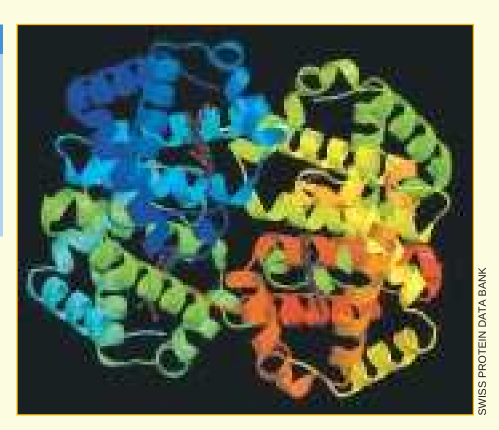
Mensch und Tier brauchen Sauerstoff zum Leben, weil sie ihre Nahrung in einer Art kalten Verbrennung mit dem recht reaktiven Gas umsetzen. Deshalb muss das zweiatomige Sauerstoff-Molekül im Körper genau dort hingelangen, wo es benötigt wird – also etwa in Muskeln, die gerade Arbeit leisten, oder in das Gehirn beim Denken. Zwar könnte die Versorgung in gewissem Umfang auch einfach dadurch geschehen, dass sich das Gas im Blut auflöst und per Diffusion verteilt. Aber der Natur war dieser rein physikalische Mechanismus offenbar nicht effizient genug. Und so hat sich in der Evolution ein sehr viel raffinierteres System entwickelt, das die Verfügbarkeit des Gases an verschiedenen Orten genauestens reguliert.

Es beruht nach einem in der Biologie bewährten Prinzip auf spezialisierten Transporterproteinen für das zu verteilende Gut. Beim Sauerstoff gibt es davon allerdings gleich mehrere. Sie stammen vermutlich alle von einem gemeinsamen Urtyp ab, der dem heutigen Muskelprotein Myoglobin ähnelte. Myoglobin ist die einfachste Ausführung eines Behälters für das lebenswichtige Gas. Es greift sich das erstbeste Sauerstoff-Molekül, dessen es habhaft wird, und bindet es an sein aktives Zentrum (die Hämgruppe) – im Wesentlichen ein Eisenatom in einem komplizierten organischen Ringmolekül (dem Porphyrin). Schon ein Zehntel der üblichen Sauerstoff-Konzentration in der Luft würde ausreichen, um fast alle vorhandenen Myoglobin-Moleküle zu beladen.

Das auch als Blutfarbstoff bekannte Hämoglobin hingegen reist als Fahrgast der roten Blutkörperchen im Blutstrom durch den Körper und muss imstande sein, einerseits in der Lunge zwar möglichst viel Sauerstoff aufzunehmen, ihn andererseits aber dort, wo er hingehört, auch leicht wieder abzugeben. Diese subtilere Funktion wurde im Laufe der Evolution durch mehrfache Verdopplung des Myoglobin-Gens erreicht. Das Ergebnis war ein Aggregat aus mehreren zusammenhängenden Speicherzellen. Beim Hämoglobin der Säugetiere sind es vier.

Steckbrief

- Molekulargewicht: 61 986 (ohne Hämgruppe)
- Aminosäuren: 574
- vier Untereinheiten
- Sauerstofftransporter
- Chromosom Nr. 16 (alpha) und Nr. 11 (beta)



SWISS PROTEIN DATA BANK

Hämoglobin besteht aus vier ähnlichen Untereinheiten. Jede davon enthält einen planaren Porphyrin-Ring (schwarz), der ein Sauerstoff-Atom aufnehmen kann.

Der Trick besteht nun darin, dass sich die Untereinheiten gegenseitig darüber informieren, ob sie gerade Sauerstoff enthalten oder nicht. Auf diese Weise stimmen sie untereinander ab, wie viel von dem Gas sie in der jeweiligen Situation insgesamt binden. Das erste Sauerstoff-Molekül wird dabei deutlich weniger begierig ergriffen als beim Myoglobin; je mehr Zellen aber bereits ein Sauerstoff-Molekül geladen haben, desto bereitwilliger nehmen die anderen auch noch eines auf. Insgesamt hat Hämoglobin dadurch eine geringere Affinität zum Sauerstoff als Myoglobin. Deshalb werden bei den hohen Sauerstoff-Konzentrationen, die typischerweise in den Lungen vorliegen, zwar alle vier Speicherplätze besetzt; unter den gasärmeren Bedingungen im Muskel aber tritt Hämoglobin den Stoff ohne weiteres an das Myoglobin ab. Diese Übergabe wird auch dadurch erleichtert, dass stark beanspruchtes Muskelgewebe erhebliche Mengen des „Abgases“ Kohlendioxid sowie Wasserstoff-Ionen erzeugt. Beide zusammen verdrängen den Sauerstoff aus dem Hämoglobin und reisen mit diesem zurück zur Lunge, wo sie wiederum frischem Sauerstoff Platz machen.

Obwohl alle vier Untereinheiten des Hämoglobins eine sehr ähnliche Struktur haben und auf dieselbe Weise je ein Sauerstoff-Molekül an ihre Hämgruppe binden, handelt es sich doch, genau besehen, um ein Paar von zwei (ungleichen) Paaren. Beim einem erwachsenen Menschen besteht die überwiegende Mehrheit der Sauerstofftransporter aus zwei alpha- und zwei beta-Untereinheiten. Über die Kombination dieser Bausteine kann die Natur noch einmal ganz subtil am Sauerstoffhahn drehen. Der Fötus im Mutterleib muss zum Beispiel dem mütterlichen Hämoglobin Sauerstoff entreißen, um ihn seinem eigenen Stoffwechsel zuzuführen. Deshalb treten während der Embryonalentwicklung eine ganze Reihe von Hämoglobinvarianten nacheinander auf, deren Untereinheiten sich von denen eines Erwachsenen unterscheiden und – dem griechischen Alphabet folgend – mit gamma, delta, epsilon, zeta etc. bezeichnet werden. Die für Erwachsene typische alpha-Kette gewinnt zwar bereits in der frühen Entwicklung die Oberhand, die beta-Kette aber erst einige Monate nach der Geburt.

GRAVITATION

Von Extra-Dimensionen vorerst keine Spur

Wäre die Welt zehndimensional, nähme die Schwerkraft bei sehr kleinen Abständen vielleicht stärker zu als nach Newtons Gravitationsgesetz. Jetzt gelang ein Test bis 0,2 Millimeter.

Von Georg Wolschin

In den Naturwissenschaften wird es immer dann besonders spannend, wenn Fortschritte der Experimentierkunst die Möglichkeit eröffnen, bislang unüberprüfbare theoretische Modelle oder Vorhersagen erstmals dem Realitätstest zu unterwerfen. Als Beispiel sei der experimentelle Nachweis der W- und Z-Bosonen als Trägerteilchen der schwachen Wechselwirkung genannt: 23 Jahre nach ihrer theoretischen Vorhersage konnten sie mit speziell für diesen Zweck gebauten Beschleunigern erzeugt werden, sodass sie heute gesicherter Bestandteil des physikalischen Weltbildes sind.

Deutlich exotischer noch als eine Theorie, die bestimmte Austauschteilchen als Vermittler einer grundlegenden Kraft postuliert, ist der gedankliche Entwurf eines Universums, in dem es mehr als die drei uns geläufigen Raumdimensionen gibt. Schließlich widerspricht er scheinbar aller menschlichen Erfahrung und Intuition.

Dennoch existieren gewichtige Gründe dafür, zusätzliche Dimensionen in das physikalische Weltbild einzuführen. So gelingt es nur unter dieser Bedingung, die im Standardmodell der Teilchenphysik vereinigten Grundkräfte der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung mit der Gravitation unter einen Hut zu bringen.

Die erste Theorie solcher Extra-Dimensionen entwickelte schon 1919 der deutsche Mathematiker Theodor Kaluza (1885–1954) als Privatdozent an der Universität Königsberg. Damit wollte er die beiden damals bekannten Grundkräfte Gravitation und Elektromagnetismus in einheitlicher Weise beschreiben. Die fünfte Dimension ist dabei an jeden Punkt der vierdimensionalen Raumzeit angeheftet, die der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie zu Grunde liegt. Sie lässt sich allerdings nicht wahrnehmen, weil sie eingerollt ist. Zur Veranschaulichung kann man sich ein zweidimensionales Blatt Papier vorstellen, das auch eindimensional erscheint, wenn man es zu einem Rohr mit winzigem Durchmesser aufwickelt.



ERIC ADELBERGER, UNIVERSITÄT VON WASHINGTON

Die Apparatur zur Schwerkraftmessung im Nahbereich ist vergoldet, um elektrostatische Wechselwirkungen zu minimieren.

Der schwedische Physiker Oskar Klein (1894–1974) versuchte sieben Jahre später diese Theorie mit der frisch gebackenen Quantenmechanik in Einklang zu bringen und formulierte eine Version der Schrödinger-Gleichung mit fünf Variablen (siehe „Die fünfte Dimension", Spektrum der Wissenschaft 7/88, S. 52). Wegen einiger substanzieller Probleme – so sagt die Theorie im Widerspruch zu experimentellen Befunden eine zeitabhängige Gravitationskonstante voraus – wurde der Ansatz aber nicht weiter verfolgt.

Erst Jahrzehnte später gab es wieder Versuche, die vier Grundkräfte in höherdimensionalen Räumen zu vereinheitlichen. Neuerdings liegt der Schwerpunkt auf den so genannten Stringtheorien, die allerdings mit bescheidenen fünf Dimensionen nicht auskommen – es müssen schon mindestens zehn sein (Spektrum der Wissenschaft 4/98, S. 62). Auch hier werden die höheren Dimensionen in sehr kleine Raumbereiche zusammengerollt, damit nur die vier unserer vertrauten Raumzeit übrig bleiben. Als typischer Durchmesser der eingewickelten Dimensionen gilt die so genannte Plancksche Länge von $1{,}6 \times 10^{-35}$ Metern, unterhalb derer der Raum seine gleichförmige Beschaffenheit verliert und eine diskrete Quantenstruktur offenbart.

Um in derart winzige Raumregionen „hineinschauen" zu können, bräuchte man gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation Teilchen mit einer Energie, die mindestens der Planckschen Masse von $1{,}2 \times 10^{28}$ Elektronenvolt (etwa 0,02 Milligramm) entspricht. Spätestens bei dieser Energie vereinigen sich die vier Naturkräfte zu einer universellen Wechselwirkung. Sie liegt jedoch weit jenseits der Möglichkeiten von irdischen Beschleunigern: Der Large Hadron Collider (LHC) wird, ▶

die größte je gebaute Teilchenschleuder, ab 2005 Protonen gerade mal auf $1{,}4 \times 10^{13}$ Elektronenvolt bringen.

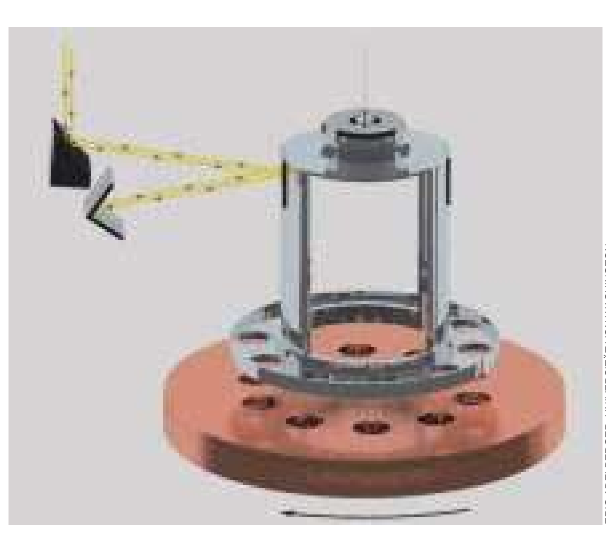
Möglicherweise existieren jedoch Auswege aus diesem Dilemma. So fanden sich in den letzten Jahren theoretische Hinweise darauf, dass die Vereinheitlichung der vier Grundkräfte bereits bei Energien einsetzen könnte, die deutlich unter der Planck-Masse liegen und mit dem LHC erreichbar wären. Insbesondere entwickelten Stringtheoretiker Vorstellungen und präzisierten sie mathematisch, wonach drei der fundamentalen Wechselwirkungen auf die üblichen drei Raumdimensionen beschränkt blieben; nur die Gravitation würde in allen zehn Dimensionen agieren (siehe „Die unsichtbaren Dimensionen", Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 44). Solche Konzepte sind mit den bisherigen Stringmodellen vereinbar. Für sie spricht, dass sie zwanglos erklären würden, warum die für die Gravitation charakteristische Planck-Masse so viel größer ist als die Massen der Elementarteilchen.

Unter diesen Umständen haben einige der zusätzlichen aufgerollten Raumdimensionen Radien, die deutlich über der Planck-Länge liegen. Wäre nur eine Extra-Dimension derart locker aufgewickelt, würde das Gravitationsgesetz allerdings bereits über astronomische Entfernungen hinweg – beispielsweise in unserem Sonnensystem – seine bekannte Newtonsche Form verlieren. Da dies offensichtlich nicht der Fall ist, müssen mindestens zwei der zusätzlichen Raumdimensionen Übergröße haben. In diesem Falle sollte sich das Gravitationsgesetz erst unterhalb genügend kleiner Distanzen ändern. Hätten die beiden Dimension beispielsweise Radien von jeweils etwa einem Millimeter, würden sich zwei Körper bei kleinerem Abstand mit der negativen vierten Potenz ihrer Entfernung anziehen statt – wie bei Newton – mit der zweiten.

Newton auf dem Prüfstand

Tatsächlich war die Gültigkeit des Gravitationsgesetzes bisher nur bis hinab zu Abständen von etwa einem Zentimeter hinreichend genau überprüft worden. Für kleinere Entfernungen – dort, wo es interessant wird – gab es bis jetzt keine zuverlässigen Daten. Im Wettlauf dreier amerikanischer Forschergruppen hat nun ein Team um Eric Adelberger an der Universität von Washington in Seattle jedoch erste Ergebnisse für kürzere Distanzen vorgelegt.

Die Gruppe konstruierte für ihr Experiment ein spezielles hochempfindliches Torsionspendel (Bild). Den Urtyp eines solchen Instruments benutzte bereits im 18. Jahrhundert Henry Cavendish (1731–1810) zur Messung der Gravitationskonstante. Die Forscher aus Seattle hängten für ihre sehr viel raffiniertere Version an einem Wolframfaden einen Ring mit zehn regelmäßig angeordneten gleich großen Löchern auf. Darunter platzierten sie in sehr geringem Abstand eine langsam rotierende Kupferscheibe mit gleichfalls zehn Löchern als Attraktor. Die Gravitationswechselwirkung zwischen beiden erzeugt am Faden ein Drehmoment, das wegen der zehnzähligen Rotationssymmetrie der Anordnung mit der zehnfachen Rotationsfrequenz variiert.



ERIC ADELBERGER, UNIVERSITÄT VON WASHINGTON

Das Torsionspendel zur Gravitationsmessung bestand aus einem Ring an einem Wolframfaden und zwei Kupferscheiben direkt darunter. In alle drei Komponenten waren zehn Löcher gebohrt. Drehmomente auf Grund der Gravitationswechselwirkung zwischen den rotierenden Scheiben und dem Ring wurden über die Reflexion eines Laserstrahls an Spiegeln gemessen.

Nun sind die genauesten Experimente oft die, bei denen auf ausgeklügelte Weise gerade verhindert wird, dass ein von Null verschiedener Messwert auftritt. Um dies zu erreichen, brachten die amerikanischen Wissenschaftler eine zweite, dickere Kupferscheibe unter der ersten an und ließen sie synchron mit dieser rotieren. Die zehn Löcher der unteren Scheibe sind etwas größer und außerdem genau in der Mitte zwischen denen der Scheibe darüber angeordnet. Dadurch kompensiert bei einem bestimmten kritischen Abstand zwischen Ring und Attraktor die untere Scheibe gerade die Gravitationswirkungen der oberen auf das Torsionspendel – allerdings nur dann, wenn die Gravitation vom Quadrat des Abstandes abhängt. Sofern das Pendel also in Ruhe bleibt, was sich durch Messen des Laserlichts feststellen lässt, das an zwei Spiegeln oben am Torsionspendel reflektiert wird, gilt Newtons Gesetz.

Bei anderen Abständen als dem kritischen Wert tritt zwar ein Drehmoment auf, aber der durch die Newtonsche Gravitation verursachte Betrag ist sehr gering, während Nicht-Newtonsche Effekte weitgehend unbeeinflusst bleiben. Adelberger und seine Mitarbeiter machten Messungen bis hin zu Abständen von 0,218 Millimetern zwischen Attraktor und Pendel.

Damit das Experiment in dieser Weise überhaupt funktionierte, mussten die Komponenten höchsten Ansprüchen genügen. So betrug die Toleranz für die Abmessungen der Scheiben und des Rings nur 2,5 Mikrometer. Um elektrostatische Kräfte weitgehend auszuschalten, waren die empfindlichen Teile des Geräts mit Goldfolie beschichtet (Bild auf Seite 22).

Das Ergebnis war enttäuschend – für die Stringtheoretiker zumindest (die Newtonianer mag es freuen): Bis hinunter zu dem erwähnten Minimalabstand von 0,218 Millimetern zeigten sich keine Abweichungen vom bekannten Gravitationsgesetz. Damit steht fest, dass auch die locker aufgerollten Extra-Dimensionen, so es sie denn überhaupt gibt, Durchmesser von deutlich unter einem Millimeter haben müssen.

Derzeit arbeiten die Wissenschaftler in Seattle an einer verbesserten Ausführung ihres Instruments, um eine noch höhere Genauigkeit bei noch kleineren Abständen zu erreichen. Bald sollten auch die ersten Ergebnisse der beiden anderen Teams vorliegen; vielleicht liefern sie bereits Aussagen für kürzere Distanzen. Es besteht also durchaus Hoffnung, in naher Zukunft doch noch quasi den Rocksaum der hypothetischen zusätzlichen Dimensionen zu erhaschen. ■

***Dr. habil. Georg Wolschin** ist Theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

VORBILDER DER PHARAONEN



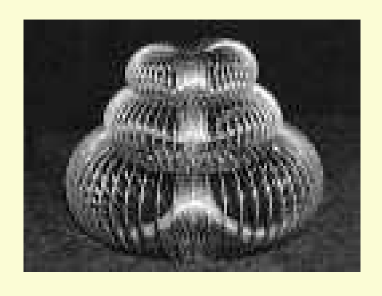
FAROUK EL-BAZ

Wie kamen die Pharaonen des Alten Reiches dazu, sich ausgerechnet Pyramiden als Grabmäler bauen zu lassen? Der Geologe Farouk El-Baz vom Zentrum für Fernerkundung der Universität Boston glaubt die Antwort gefunden zu haben. Wie er in der Ausgabe März/April von „Archaeology" schreibt, leisteten Nomaden, die wegen der zunehmenden Dürre aus der Wüste ins Niltal zogen, einen wesentlichen Beitrag zur altägyptischen Kultur. Sie aber kannten durch Winderosion geschaffene Landformen, die Pyramiden sehr ähnlich sehen (oben). Auch der Sphinx könnte durch natürliche Vorbilder inspiriert sein: In der Lybischen Wüste wurden viele Felsbrocken durch Sandstürme so abgeschliffen, daß sie gekenterten Bootsrümpfen gleichen. Unter diesen so genannten Yardangs gibt es Formen, die verblüffend an die sagenhaften Wächter der Pyramiden erinnern.

FAROUK EL-BAZ

Science and Fun

Spektrum DER WISSENSCHAFT



DREIFACH-TORUS

Diese drei Tori in verschiedenen Größen bieten viel. Aus schraubenförmig gedrehten Metallbändern gewickelt, können sie einander durchdringen – und auseinander hervorspringen. Ein ergiebiges Spielzeug für Erwachsenenfinger; **DM 99,–.**



AVOIDER III

Das mechanische „Haustier" Avoider braucht kein Futter. Sie müssen es nur zusammenbauen und für seine Bewegungsfreiheit sorgen. Es ist mit einem Lichtsensor ausgestattet und umläuft mit seinen sechs Beinen geschickt alle Hindernisse. Maße zusammengebauter Roboter 11x14x14 cm. Für den Zusammenbau ist ein Lötkolben erforderlich. **DM 132,–.**

WENDEKREISEL

Lassen Sie sich von einem physikalischen Prinzip faszinieren, das schon Generationen von Wissenschaftlern zu angeregten Diskussionen verleitet hat. In Drehung versetzt, verliert der Kreisel seine stabile Ruhelage und kommt ins Schleudern. Dreht er sich schnell genug, setzt er irgendwann mit seinem Stiel auf dem Boden auf und steht Kopf; **DM 34,–.**



FUNK-THERMOMETER

Das Design-Thermometer misst nicht nur die Raumtemperatur. Es wird komplett mit Batterien und einem Sensor für die Außentemperatur geliefert. Die integrierte Funkuhr zeigt Ihnen immer die genaue Uhrzeit an; **DM 94,–.**



JUNIOR WISSEN



GLOBE 4 KIDS

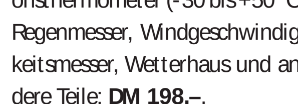
Mit diesem Kinderglobus können künftige Weltenbummler unseren Planeten erforschen. Neben den geographischen Grenzen enthält er über 100 Zeichnungen von Tieren, Monumenten und Sehenswürdigkeiten einzelner Länder und Regionen; **DM 54,–.**

KACHELMANNS WETTERSTATION

Jörg Kachelmann lässt in seiner Wetterstation nicht nur die Geheimnisse eines Gewitters aufblitzen, sondern zeigt auch, wie Hurrikans entstehen oder wie der Körper auf verschiedene Wetterlagen reagiert. Inhalt: 2 Präzisionsthermometer (-30 bis +50 °C), Regenmesser, Windgeschwindigkeitsmesser, Wetterhaus und andere Teile; **DM 198,–.**



ZICKE ZACKE



Bei der Hühnerolympiade steht die Disziplin Federklau auf dem Programm. Dabei versuchen die 2 - 4 mitspielenden „Hühner", sich gegenseitig zu überholen. Aber nur, wer sich auf dem Hühnerhof auskennt, kommt gut voran. Das Spiel für kleine Kinder ab 4 Jahren trainiert das Gedächtnis. Spieldauer: 10 - 15 Minuten; **DM 59,–.**



SOLAR-BOX 77

Mit den 460 Einzelteilen des Baukastens (inkl. farbiger Bauanleitung) können verschiedene Modelle wie Kettenkarussell, Fahrradfahrer, Windmühle und Flugzeug gebaut werden. Die Box enthält eine 1,5 Volt Solarzelle mit Motor. Empfohlen ab 8 Jahren; **DM 130,–.**



INFORMATIONS- UND BESTELLSERVICE →

ASTRONOMIE

Erbe vergangener Nachbarn

Kugelsternhaufen enthalten Zehntausende bis Milliarden Sterne auf engstem Raum. Vor 12 bis 16 Milliarden Jahren entstanden, können sie sich nicht mehr verjüngen, da ihnen ein interstellares Gas als Rohstoff für neue Sterne fehlt. Massereiche Objekte, die ihren Lebenszyklus rasch durchlaufen, sind längst als Supernovae explodiert. Und so bestehen die Haufen heute vorwiegend aus kleinen, langlebigen Individuen, die sich in ähnlichen Entwicklungsstadien befinden. Deshalb sollten sie sich auch in ihrer chemischen Zusammensetzung gleichen. Doch dem widersprechen jetzt Daten von dem 14 000 Lichtjahre entfernten Sternhaufen NGC6752. Forscher um Raffaele Gratton am Osservatorio Astronomico di Padova (Italien) untersuchten ihn mit dem Very Large Telescope der ESO in Chile. Sie fanden, dass die Gehalte der leichteren Elemente Sauerstoff, Natrium, Magnesium und Aluminium überraschend stark schwankten. Ihrer Ansicht nach kann die Ursache nicht in den Sternindividuen selbst liegen. Sehr viel wahrscheinlicher ist, dass massereiche Sterne, die schon früh explodierten, mit ihren Explosionswolken die sich langsamer entwickelnden kleinen Sterne oder gar Sternkeime kontaminiert haben. *(Astronomy & Astrophysics, Bd. 369, S. 87)*



ANGLO-AUSTRALIAN OBSERVATORY

Chemisch uneinheitlich: Kugelsternhaufen NGC6752

MOLEKULARGENETIK

Frauenraub der Wikinger

Kriegsschiff der Wikinger

BARRY ROSS, NACH SUNE VILLUM-NIELSEN

Die Isländer sind stolz darauf, ihre Ahnen bis zu den Wikingern zurückverfolgen zu können. Doch die kühnen Seefahrer sind nicht die einzigen Vorfahren der heutigen Inselbewohner. Wissenschaftler um Agnar Helgason von der Universität Oxford sowie von deCODE Genetics in Reykjavik nahmen jetzt 1700 Personen aus Island, Großbritannien, Skandinavien und anderen Regionen unter die Lupe. Indem sie die DNA der Mitochondrien analysierten, die nur mit den Eizellen weitergegeben wird, erhielten sie Auskunft über die mütterliche Linie des Stammbaums. Dabei zeigte sich, dass sechzig Prozent der weiblichen Vorfahren nicht Skandinavier, sondern Kelten waren. Dagegen hatte eine vorangegangene Analyse männlicher Y-Chromosomen ergeben, dass die Männer zu achtzig Prozent aus Skandinavien kamen. Damit bestätigt modernste Genetik eine isländische Handschrift aus dem 12. Jahrhundert. Das „Buch der Landnahme" enthält zahlreiche Hinweise, dass die ersten Frauen Islands nicht gemeinsam mit den Männern von Skandinavien aufgebrochen sind, sondern überwiegend von den Britischen Inseln stammen. Vermutlich raubten die Wikinger sie dort aus keltischen Siedlungen, als sie auf dem Weg nach Island im Nordwesten Britanniens Zwischenstation machten. *(American Journal of Human Genetics, Bd. 68, S. 723)*

GESCHICHTE

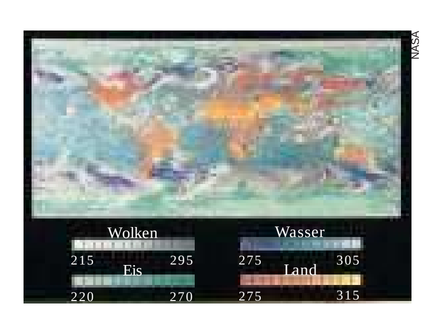
Arsen in Spitzenwerten

Eigentlich waren die Wissenschaftler vom Institut für Geographie der Russischen Akademie der Wissenschaften auf der Suche nach Umweltschadstoffen – doch dann bestätigten sie eine Legende: Im mittelalterlichen Kreml wurde mit Blei und Quecksilber nicht nur gemalt und geschminkt, sondern auch gemordet. Die Knochen und Haare der dort begrabenen Prinzessinnen und Zarizas enthielten ungewöhnlich große Mengen Schwermetall. Alexander Alexandrovskiy vermutet, dass die Frauen diesen toxischen Stoffen im Alltag häufig ausgesetzt waren: Kosmetika und Wandfarben enthielten große Mengen Quecksilber, Arsen oder Blei. Dasselbe galt für viele medizinische Salben – von Arsen z.B. versprach man sich Heilung von Mandelentzündung und Typhus. Doch nicht immer blieb es bei der unabsichtlichen schleichenden Selbstvergiftung. Die mit der Behörde für Forensische Medizin kooperierenden Forscher fanden in Knochen, Haarzopf und Leichentuch von Anastasia Romanova – der Gattin Iwans des Schrecklichen, die 1560 mit 25 Jahren starb – extreme Quecksilberwerte, die auch mit ausgiebigem Gebrauch der Salben nicht zu erklären sind. Desgleichen wurde Elena Glinskaya, zweite Frau von Wassilij III., 1538 Opfer des beliebtesten Giftes im Mittelalter: Eine Haarsträhne in ihrer Mütze enthielt reichlich Quecksilber.

TREIBHAUSEFFEKT

Wärmegedämmte Erde

Ein Vergleich von Satellitendaten aus den Jahren 1970 und 1997 hat jetzt bestätigt, dass Methan, Kohlendioxid, Ozon und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) den Treibhauseffekt der Atmosphäre verstärken. Bislang basierten alle Studien über die veränderte Wärmeabstrahlung der Erde auf Simulationen. Nun aber legte das Team um John Harris vom Imperial College in London seinen Untersuchungen erstmals reale Messwerte zu Grunde. Sowohl die amerikanische Raumsonde Nimbus 4 als auch der japanische ADEO-Satellit hatten jeweils mehrere Monate lang das von der Erde ausgehende Infrarotspektrum – die Wärmestrahlung – mit Spezialkameras aufgezeichnet. Um vergleichbare Werte zu erhalten, rechneten die Forscher Störfaktoren wie die unterschiedliche Bewölkung heraus und berücksichtigten nur die Monate, in denen beide Sonden Daten aufgenommen hatten. Die Auswertung ergab, dass die Infrarotstrahlung genau bei den Wellenlängen abnimmt, bei denen die Treibhausgase Absorptionsbanden haben. So lässt der Anstieg des Methangehalts der Atmosphäre die Erde vom All aus heute um etwa 4 °C kälter erscheinen als 1970; Kohlendioxid isoliert um 1 °C. An der Erdoberfläche ist es dafür wärmer. *(Nature Bd. 410, S. 355)*



NASA

Temperaturkarte der Erde aus dem All von 1983 (Werte in Kelvin)

MIKROBIOLOGIE

Lepra-Erreger mit Schrumpfgenom

Die Lepra hat ihren Schrecken noch nicht verloren: Im Jahr 2000 wurden 700 000 Neuerkrankungen registriert. Und die sprichwörtliche Geißel der Menschheit gibt weiter Rätsel auf. Zwar ist das 1873 entdeckte Lepra-Bakterium der erste Keim, der als Krankheitserreger erkannt wurde. Doch bis heute ist es nicht gelungen, ihn auf künstlichen Nährmedien zu züchten, was seine Erforschung erheblich erschwert. Jetzt hat ein internationales Team um Stewart T. Cole vom Pariser Institut Pasteur eine Erklärung dafür gefunden. Die Forscher verglichen das Erbgut des Lepra-Bakteriums mit den Genen des eng verwandten Tuberkulose-Keims. Mit erstaunlichem Ergebnis: Während die Erbsubstanz der Tuberkel-Bakterien etwa 4000 Gene enthält, sind es bei den Lepra-Erregern gerade einmal 1600. Wo die Tuberkeln für eine Stoffwechselfunktion meist mehrere Proteine bereit halten, haben die Lepra-Bakterien nur eine Minimalausstattung. Zudem sind ihre biochemischen Fähigkeiten sehr lückenhaft: Hier fehlt ein Enzym in der Atmungskette, dort können sie ein Substrat nicht verwerten. Durch erfolgreiche Anpassung ist es den Lepra-Erregern vermutlich geglückt, sich perfekt in den Stoffwechsel des Wirtes einzuklinken. Dass sie dabei verlernt haben, auf toten Nährmedien zu gedeihen, hat ihnen nicht weiter geschadet. *(Nature, Bd. 409, S. 1007)*


WHO

Opfer eines minimalistischen Schmarotzers

BOTANIK

An der Nase herumgeführt

Florian Schiestl, Manfred Ayasse und Hannes F. Paulus von der Universität Wien haben einen neuen Mechanismus entdeckt, mit dem eine Orchidee Sandbienen zu noch nicht befruchteten Blüten ihres Blütenstandes umleitet. Sie analysierten den Duft der Spinnen-Ragwurz per Gaschromatograph und stellten dabei fest, dass die Blüten unmittelbar nach der Bestäubung durch die Bienenmännchen ihr Bukett signifikant veränderten: Sie rochen jetzt zusätzlich nach Farnesyl-hexanoat, einem Stoff, den auch Sandbienenweibchen nach erfolgreicher Befruchtung verströmen und der weitere Männchen von Begattungsversuchen abhält. Als Gegenprobe bepinselten die Forscher unbestäubte Blüten mit der Substanz – die wurden daraufhin prompt von den Männchen gemieden. Auf diese Weise erreicht die Pflanze, dass die recht seltenen Sandbienen ihre Aufgabe schnellstmöglich erfüllen: Das spart der Pflanze Zeit und Pollen – und damit wertvolle Ressourcen. Der neu hinzukommende Geruchsstoff ist dabei ein wirksamerer Wegweiser für die Bienenmännchen als ein allmähliches Ausduften der Blüten. Generell scheint diese bislang kaum untersuchte Strategie unter Orchideen weit verbreitet zu sein. Manche tropischen Vertreter ändern nach erfolgreicher Bestäubung beispielsweise rasch ihre Farbe. *(Oecologia, Bd. 126, S. 531)*

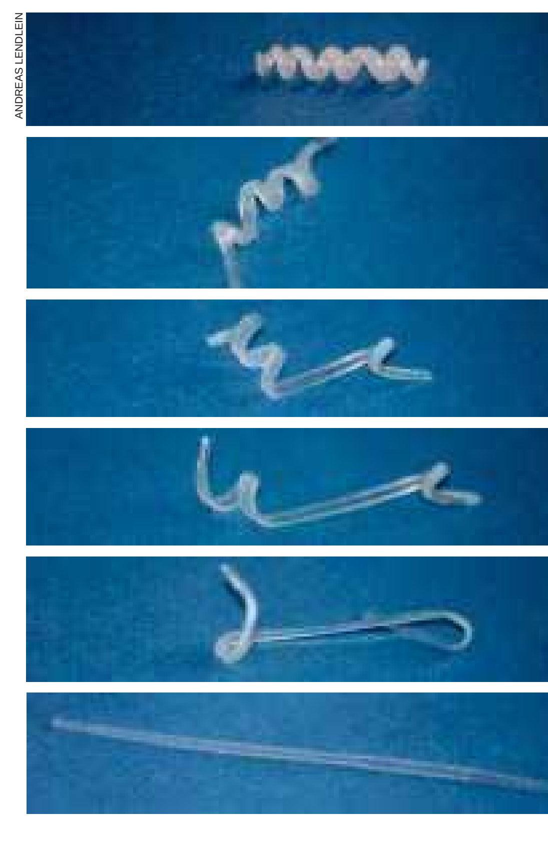

FLORIAN SCHIESTL

Fehlgeleiteter Freier: Sandbienenmännchen an Orchidee

MATERIALFORSCHUNG

Auch Plastik kann sich erinnern

Einen vielseitig verwendbaren Kunststoff mit Formgedächtnis haben jetzt Andreas Lendlein vom Deutschen Wollforschungsinstitut der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und Robert Langer vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge entwickelt. Selbst nach Deformationen um mehrere hundert Prozent erinnert sich das Plastikmaterial an seine ursprüngliche Gestalt und nimmt sie beim Erwärmen innerhalb von Sekunden wieder an. Metalllegierungen mit Formgedächtnis – etwa die Nickel-Titan-Legierung Nitinol – sind schon länger bekannt; aus ihnen werden bereits Brillengestelle oder Zahnspangen hergestellt. Während diese eine Vorbehandlung bei Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius erfordern, kann das Kunststoffprodukt durch bloßes Bestrahlen der Ausgangsreaktionsmischung mit ultraviolettem Licht in jeder gewünschten Gestalt fixiert werden. Wenn es nach einer beliebigen Deformation – beispielsweise zu einer Spirale (Bild) – auf 70 °C erhitzt wird, nimmt es diese ursprüngliche Gestalt wieder an. Es ist sogar möglich, den Kunststoff für ein bestimmtes Anwendungsgebiet maßzuschneidern: Entscheidend sowohl für die Umwandlungstemperatur, bei der er zur ehemaligen Gestalt zurückkehrt, als auch für die mechanischen Eigenschaften ist das Mischungsverhältnis der Bestandteile Oligo(ε-caprolacton)dimethacrylat und n-Butylacrylat. Weil der Werkstoff gewebeverträglich ist, kann er auch in der Medizin eingesetzt werden. Theoretisch eignet er sich sogar für Autokarosserien; nach einem Unfall muss man die Delle dann bloß noch föhnen… *(Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 98, S. 842)*


ANDREAS LENDLEIN

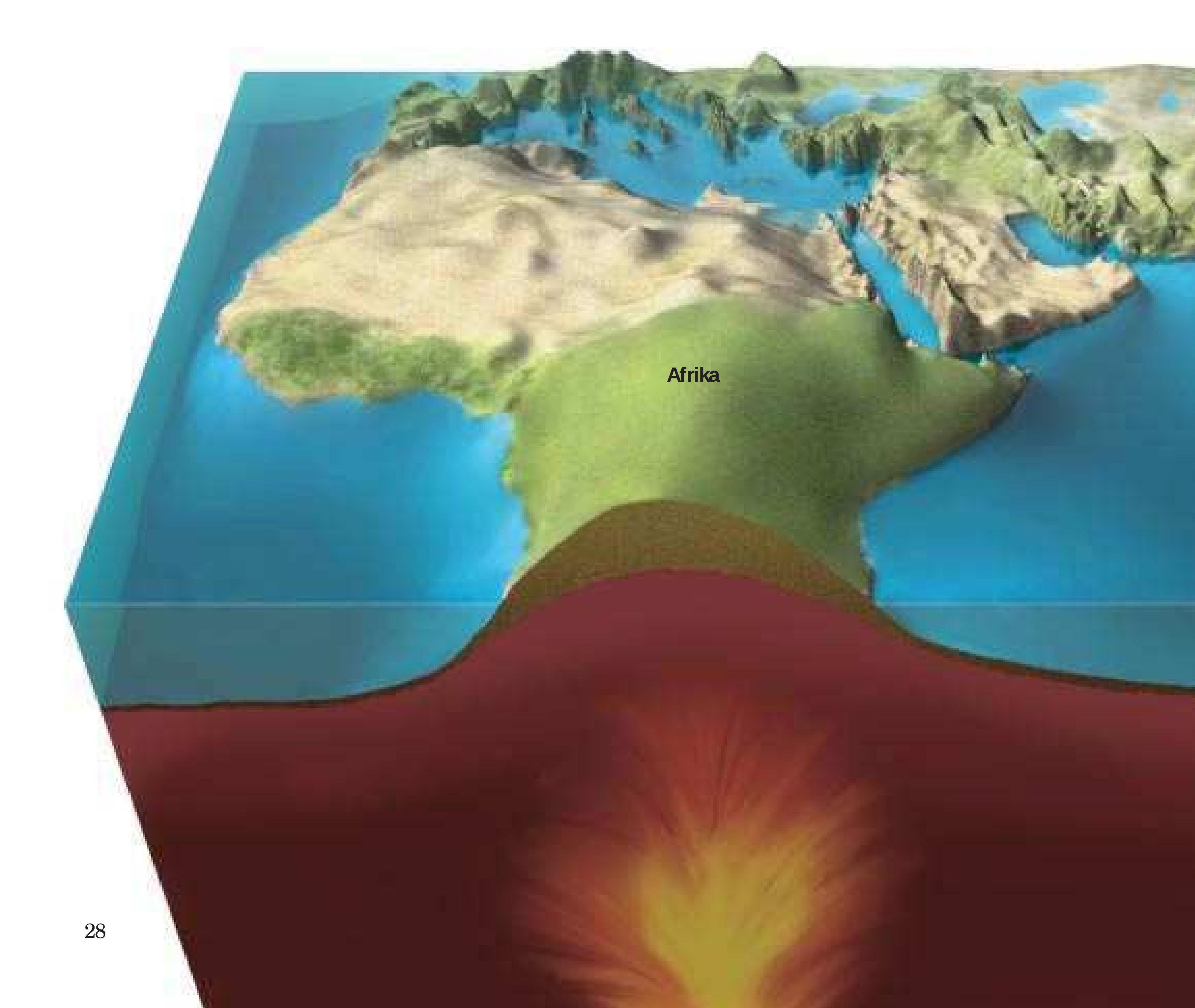
Wie durch Geisterhand streckt sich die auf 70 °C erwärmte Spirale: Nach 30 Sekunden ist sie wieder ein glatter Faden.

GEOPHYSIK

Die verbeulte Erde

Wie Kräfte aus der Tiefe den Planeten verformen

Nicht nur die Plattentektonik gestaltet die Erdkruste. Gesteinsströme im Erdmantel heben und senken ganze Kontinente, ohne dass Krustenplatten miteinander kollidieren. Gewaltige Plateaus entstehen so – wie im südlichen Afrika.



Von Michael Gurnis

Laut geologischer Lehrmeinung formen gewaltsame Kollisionen zwischen riesigen tektonischen Platten, den beweglichen Bruchstücken der Gesteinshülle unseres Planeten, das Antlitz der Erde. So türmte der Zusammenstoß von Indien mit Asien den mächtigen Himalaya auf, und die Anden wuchsen empor, als sich der Boden des Pazifiks unter Südamerika zu schieben begann. Doch selbst die enormen Kräfte der Plattentektonik bieten für einige der spektakulärsten Oberflächenformen des Globus keine ausreichende Erklärung.

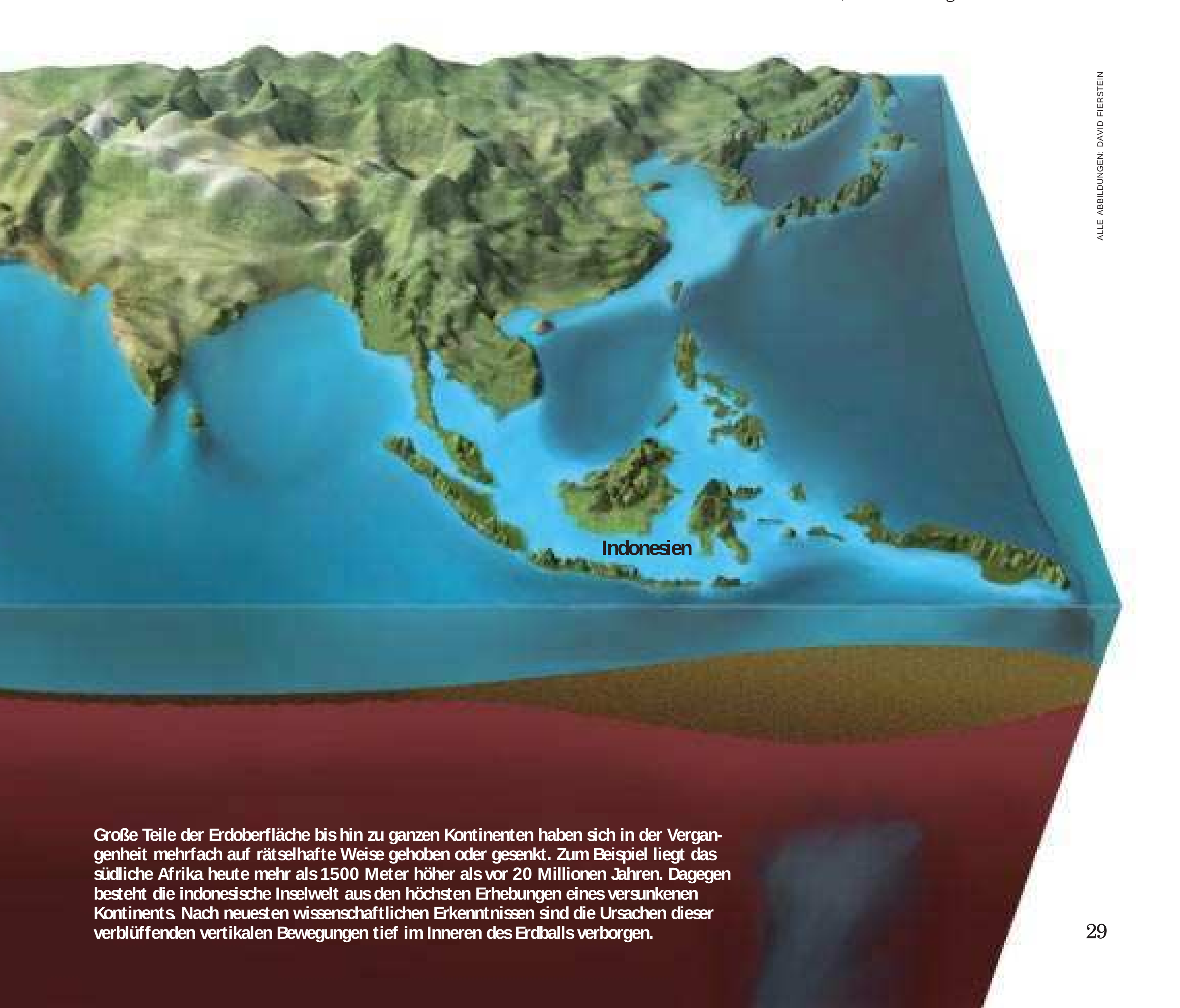
So erstreckt sich im südlichen Afrika eines der größten Plateaus auf der Erde; es misst mehr als 1600 Kilometer im Durchmesser und ist rund 1500 Meter hoch. Geologischen Befunden zufolge haben sich diese Landmasse und der umgebende Ozeanboden in den letzten 100 Millionen Jahren langsam gehoben, obwohl in dem Gebiet seit fast 400 Millionen Jahren keine Plattenkollision stattfand.

Die so genannte Afrikanische Superschwelle ist nur ein Beispiel für dramatische vertikale Bewegungen weiter Bereiche der Erdoberfläche. In der Vergangenheit sanken riesige Teile von Australien und Nordamerika bis zu 1500 Meter ab – und tauchten wieder auf.

Wissenschaftler, die sich auf die Erforschung des Erdinneren spezialisiert haben, vermuten seit langem, dass hinter solchen Auf- und Abbewegungen dynamische Prozesse tief unter der Oberfläche unseres Planeten stecken. Ihr Verdacht richtete sich schon früh auf den Erdmantel, der direkt unterhalb des Mosaiks der tektonischen Platten liegt. Seine glühend heißen Gesteinsmassen reichen fast 3000 Kilometer hinab bis zum eisernen Erdkern.

Geophysiker erkannten bald, dass bei den hohen Temperaturen und dem enormen Druck im Mantel auch scheinbar festes Gestein über Jahrtausende hinweg zäh wie Sirup fließen kann. Doch anfangs blieb unklar, wie dieses Kriechen vertikale Bewegungen großen Ausmaßes hervorrufen kann. Inzwischen gibt es leistungsfähige Computermodelle, die Momentaufnahmen vom heutigen Mantel mit Informationen darüber kombinieren, wie sich diese Erdschicht in der Vergangenheit verhalten hat. Mit ihnen lässt sich das erstaunliche Auf und Ab großer Teile der Erdoberfläche mittlerweile recht gut verstehen.

Seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wissen Geophysiker, dass der Mantel über lange geologische Zeiträume hinweg nicht nur kriecht – er wälzt sich auch um und brodelt wie ein Topf mit dicker Suppe, die kurz vor dem Kochen steht. Das heißeste Gestein hat eine verhältnismäßig geringe Dichte; es erfährt deshalb einen Auftrieb, der es langsam empordringen lässt. Dagegen sinkt kühleres, dichteres Material ab, bis es durch die Wärme, die aus dem geschmolzenen Kern



ALLE ABBILDUNGEN: DAVID FIERSTEIN

Große Teile der Erdoberfläche bis hin zu ganzen Kontinenten haben sich in der Vergangenheit mehrfach auf rätselhafte Weise gehoben oder gesenkt. Zum Beispiel liegt das südliche Afrika heute mehr als 1500 Meter höher als vor 20 Millionen Jahren. Dagegen besteht die indonesische Inselwelt aus den höchsten Erhebungen eines versunkenen Kontinents. Nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen sind die Ursachen dieser verblüffenden vertikalen Bewegungen tief im Inneren des Erdballs verborgen.

entweicht, genügend aufgeheizt wird, um wieder aufsteigen zu können. Dieses dreidimensionale Bewegungsmuster, die so genannte Konvektion, setzt die horizontale Wanderung tektonischer Platten in Gang. Doch schien zunächst zweifelhaft, ob die resultierenden Kräfte imstande wären, die Erdoberfläche auch zu heben oder zu senken.

Diese Einschätzung begann sich zu ändern, als Geophysiker staunend auf die ersten noch ziemlich unscharfen „Bilder" des Erdinneren blickten und so die Macht des Mantels zu begreifen begannen. Vor etwa zwanzig Jahren entwickelten Adam M. Dziewonski am California Institute of Technology in Pasadena und seine Kollegen die so genannte seismische Tomographie, um dreidimensionale Momentaufnahmen von den tiefen Erdregionen zu erzeugen (Spektrum der Wissenschaft 12/84, S. 62). Dazu verwendeten sie Messdaten von Vibrationen, die durch Erdbeben in der äußeren Schale des Globus ausgelöst werden.

Die Geschwindigkeiten dieser so genannten seismischen Wellen hängen von chemischer Zusammensetzung, Temperatur und Druck der Gesteine ab, durch die sie sich fortpflanzen. In heißem Material geringer Dichte werden sie abgebremst. In kälteren, dichteren Regionen können sie sich dagegen besonders schnell ausbreiten. Durch die Messung der Zeit, welche seismische Wellen vom Epizentrum (Herd) eines Erdbebens bis zu einer Empfangsstation an der Erdoberfläche benötigen, lassen sich so Rückschlüsse auf Temperatur und Dichte in einem bestimmten Segment des Erdinneren ziehen. Wenn man für Tausende von Erdbeben rund um den Globus die seismischen Geschwindigkeiten ermittelt, kann man daraus eine Karte von Temperatur und Dichte im gesamten Erdmantel erstellen.

Diese seismischen Momentaufnahmen wurden um so schärfer und detaillierter, je genauere Verfahren zur Auswertung der seismischen Daten die Forscher entwickelten. Und so kamen dabei kürzlich einige unerwartete Strukturen in den tiefsten Teilen des Mantels ans Licht (Bild rechts). Wie sich herausstellte, liegt die größte davon direkt unter der Südspitze Afrikas. Vor etwa zwei Jahren berechneten die Seismologen Jeroen Ritsema und Hendrik-Jan van Heijst vom California Institute of Technology, dass sich das pilzförmige Gebilde vom Kern aus etwa 1500 Kilometer nach oben erstreckt und eine Ausdehnung von mehreren tausend Kilometern hat.

Geister der Vergangenheit

Sofort stellten sie sich die Frage, ob dieser gewaltige Pilz vielleicht in der Lage wäre, eine Landmasse wie Afrika anzuheben. Da es sich um eine Region handelt, in der sich seismische Wellen langsam fortpflanzen, muss sie heißer sein als der umgebende Mantel. Nach den Gesetzen der Konvektionsphysik aber sollte eine heiße Region aufsteigen.

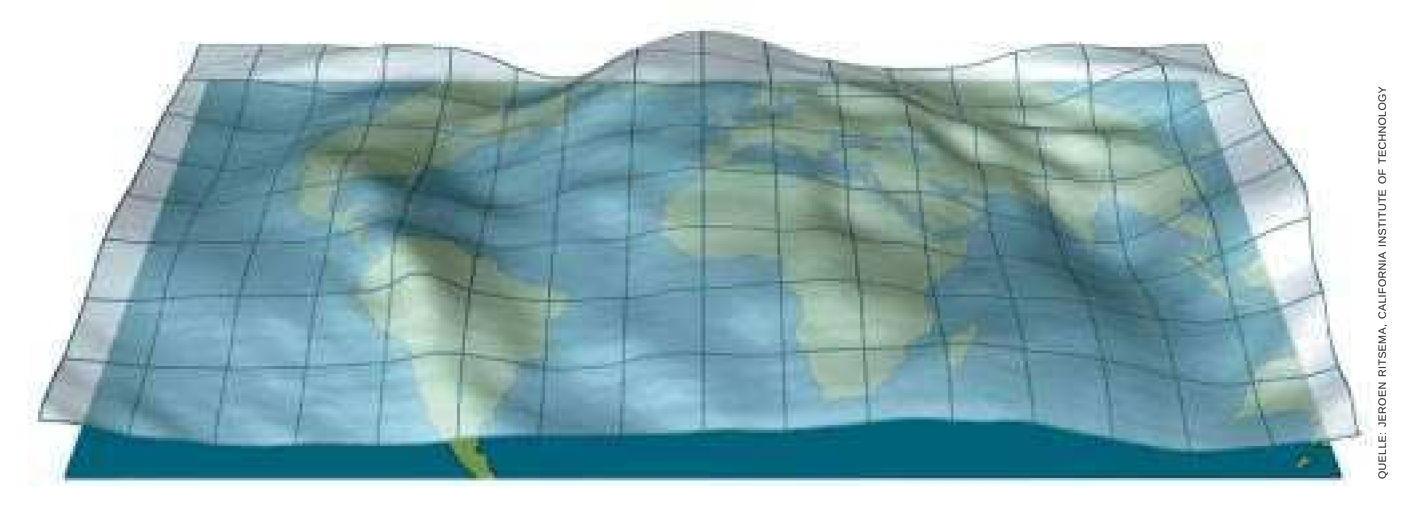
Nun gibt eine seismische Momentaufnahme nur die augenblickliche Position der betreffenden Struktur wieder. Hätte der Pilz zum Beispiel eine andere Zusammensetzung als das umgebende Gestein, würde er trotz seiner höheren Temperatur vielleicht nicht aufsteigen. Gemeinsam mit Jerry X. Mitrovica, einem Geophysiker an der Universität Toronto, entschloss ich mich daher, einen Zeitrafferfilm von den möglichen Ereignissen anzufertigen. Wir gaben Form und vermutete Dichte des heißen Gesteinspakets sowie Schätzungen darüber, wann Südafrika sich zu heben begann, in ein Computerprogramm ein, das die Mantelkonvektion simuliert. Dadurch fanden wir im vorigen Jahr heraus, dass der Pilz tatsächlich genügend Auftrieb hat, um langsam im Mantel aufzusteigen – und Afrika dabei nach oben zu drücken.

Seismische Momentaufnahmen und Computermodelle – die Grundwerkzeuge der Geophysiker – genügten also, das Rätsel der Afrikanischen Superschwelle zu lösen. Die Analyse des Auf und Ab von Nordamerika und Australien erwies sich dagegen als komplizierter. Hier führten erst Umwege zum Ziel. Dabei wurde uns eines klar: Geophysiker, die nur den Mantel in seinem heutigen Zustand betrachten, können nicht zufriedenstellend erklären, wie dynamische Vorgänge in dieser Schicht die Erdoberfläche formen; wer die tieferen Zusammenhänge erkennen will, kommt nicht daran vorbei, Anleihen bei der traditionellen Geologie mit ihrer historischen Perspektive zu machen.

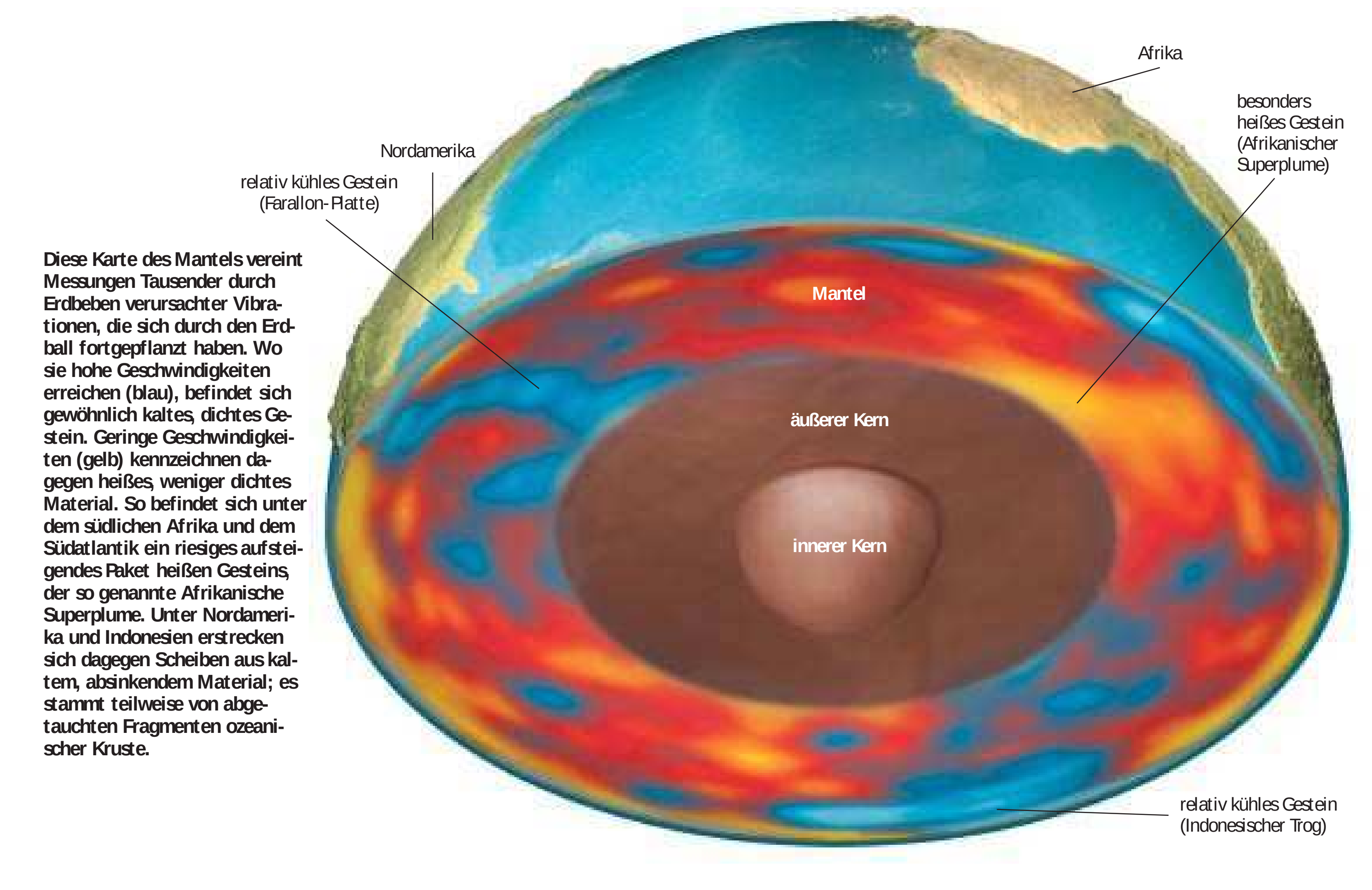
Wichtige Erkenntnisse, die später entscheidend zum Verständnis der Vertikalbewegungen Australiens und Nordamerikas beitragen sollten, erbrachten Forschungen zu einer scheinbar völlig anderen Fragestellung in den 1960er Jahren. Dabei ging es um den Einfluss der Dichte des Mantelgesteins auf das Schwerefeld der Erde. Damals erwarteten die Geophysiker, dass die Gravitation über Regionen heißen Gesteins, die weniger dicht sind und daher weniger Masse haben, geringer wäre als anderswo. Doch als sie erstmals die lokalen Schweredaten zu einer globalen Karte zusammenstellten, fanden sie keinen Zusammenhang zwischen der örtlichen Gravitation und den kalten oder heißen Teilen des Mantels.

Clement G. Chase, der heute an der Universität von Arizona in Tucson tätig ist, entdeckte Ende der 1970er sowie Anfang der 1980er Jahre sogar ein entgegengesetztes Muster. Als er Regionen

Schwellen und Tröge in der transparent gezeichneten Fläche über der Weltkarte repräsentieren lokale Variationen im Schwerefeld der Erde. An Beulen ist die Gravitation besonders stark; hier befindet sich offenbar ein Massenüberschuss in der Tiefe. Dellen treten dagegen dort auf, wo ein Massendefizit die Gravitation unter den Durchschnittswert absenkt. Solche Unterschiede in der Schwerkraft weisen auf Unregelmäßigkeiten in der Struktur des Erdmantels hin.



QUELLE: JEROEN RITSEMA, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



Diese Karte des Mantels vereint Messungen Tausender durch Erdbeben verursachter Vibrationen, die sich durch den Erdball fortgepflanzt haben. Wo sie hohe Geschwindigkeiten erreichen (blau), befindet sich gewöhnlich kaltes, dichtes Gestein. Geringe Geschwindigkeiten (gelb) kennzeichnen dagegen heißes, weniger dichtes Material. So befindet sich unter dem südlichen Afrika und dem Südatlantik ein riesiges aufsteigendes Paket heißen Gesteins, der so genannte Afrikanische Superplume. Unter Nordamerika und Indonesien erstrecken sich dagegen Scheiben aus kaltem, absinkendem Material; es stammt teilweise von abgetauchten Fragmenten ozeanischer Kruste.

von mehr als 1500 Kilometer Ausdehnung betrachtete, stellte er fest, dass die Gravitation nicht über kaltem Mantelgestein am stärksten ist, sondern über isolierten Vulkangebieten, den so genannten heißen Flecken (Hot Spots).

Vielleicht noch überraschender war, was er über einen langen Streifen geringer Schwere herausfand, der sich von der Hudson Bay in Kanada zum Nordpol, dann durch Sibirien und Indien bis hinunter zur Antarktis zieht (Bild links). Rekonstruktionen der einstigen Anordnung tektonischer Platten ergaben, dass der Bereich niedriger Gravitation eine Reihe von Stellen markiert, an denen vor 125 Millionen Jahren solche Platten in den Mantel abtauchten. Es schien, als ob der Geist ehemaliger Subduktionszonen, wie man derartige Stellen nennt, die Schwerkraft vermindern würde. Doch falls kalte, dichte Bruchstücke des Meeresbodens immer noch durch den Mantel absänken, müsste die Gravitation dort besonders hoch sein und nicht, wie von Chase beobachtet, ungewöhnlich gering.

Mitte der 1980er Jahre löste der Geophysiker Bradford H. Hager, heute am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, diesen scheinbaren Widerspruch auf. Er gab zu bedenken, dass andere Faktoren als die Temperatur Gesteinspakete mit Massenüberschuss oder -defizit im Mantel erzeugen könnten. Dabei griff er auf die Fluiddynamik zurück – also die Physik strömender Flüssigkeiten; denn als ein solches Medium verhält sich der Mantel über längere Zeiträume hinweg.

Wenn eine Flüssigkeit geringer Dichte aufsteigt, wie das bei den heißesten Regionen des Mantels der Fall ist, drückt die Kraft der Fließbewegung das darüber liegende dichtere Material nach oben. Diese allmähliche Hebung oberhalb des eigentlichen Aufstrombereichs erzeugt einen Überschuss an Masse (und folglich stärkere Gravitation) an der Erdoberfläche. Analog kann die Gravitation über kaltem, dichtem Material geringer sein. Wenn dieses absinkt, zieht es nämlich Masse mit nach unten, die sich einst unter der Oberfläche befand.

Kontinente als Fahrstühle

Das erklärt, warum die Geister von Subduktionszonen einen Streifen geringer Schwere erzeugen konnten: Ein Teil dieses kalten, abgetauchten Meeresbodens sinkt offenbar immer noch innerhalb des Mantels ab – und zieht dabei Material nahe der Erdoberfläche mit nach unten. Träfe Hagers Deutung zu, hieße das, dass Mantelgestein die feste Erdschale nicht nur dadurch beeinflusst, dass es an vielen Stellen horizontal darunter entlangkriecht; auch die weiträumigen Auf- und Abströme in der Tiefe würden sich bis zur Oberfläche durchpausen: Aufsteigende Bereiche drückten das Land darüber nach oben, absinkende Bereiche zerrten es mit hinab.

Zur selben Zeit als Chase und Hager diesen Mechanismus entdeckten, der beträchtliche Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche verursachen konnte, stießen Geologen auf erste Beweise dafür, dass sich Kontinente tatsächlich in der Vergangenheit wie Fahrstühle auf und ab bewegt haben. Weltweit enthalten Gesteinsformationen Hinweise auf Meeresspiegelschwankungen. Die meisten Geologen nahmen an, diese Fluktuationen rührten von Variationen des Wasservolumens in den Ozeanen her und beträfen deshalb alle Kontinente gleichermaßen. Doch einige Forscher lieferten überzeugende Belege dafür, dass die stärksten Fluktuationen des Meeresspiegels in Wahrheit auf vertikale Bewegungen einzelner Kontinente zurückzuführen sind. Wenn sich zum Beispiel eine Landmasse relativ zu den anderen nach oben bewegt, sieht es so aus, als sänke die Ozeanoberfläche ringsherum ab, während sie rund um die übrigen Kontinente unverändert bliebe.

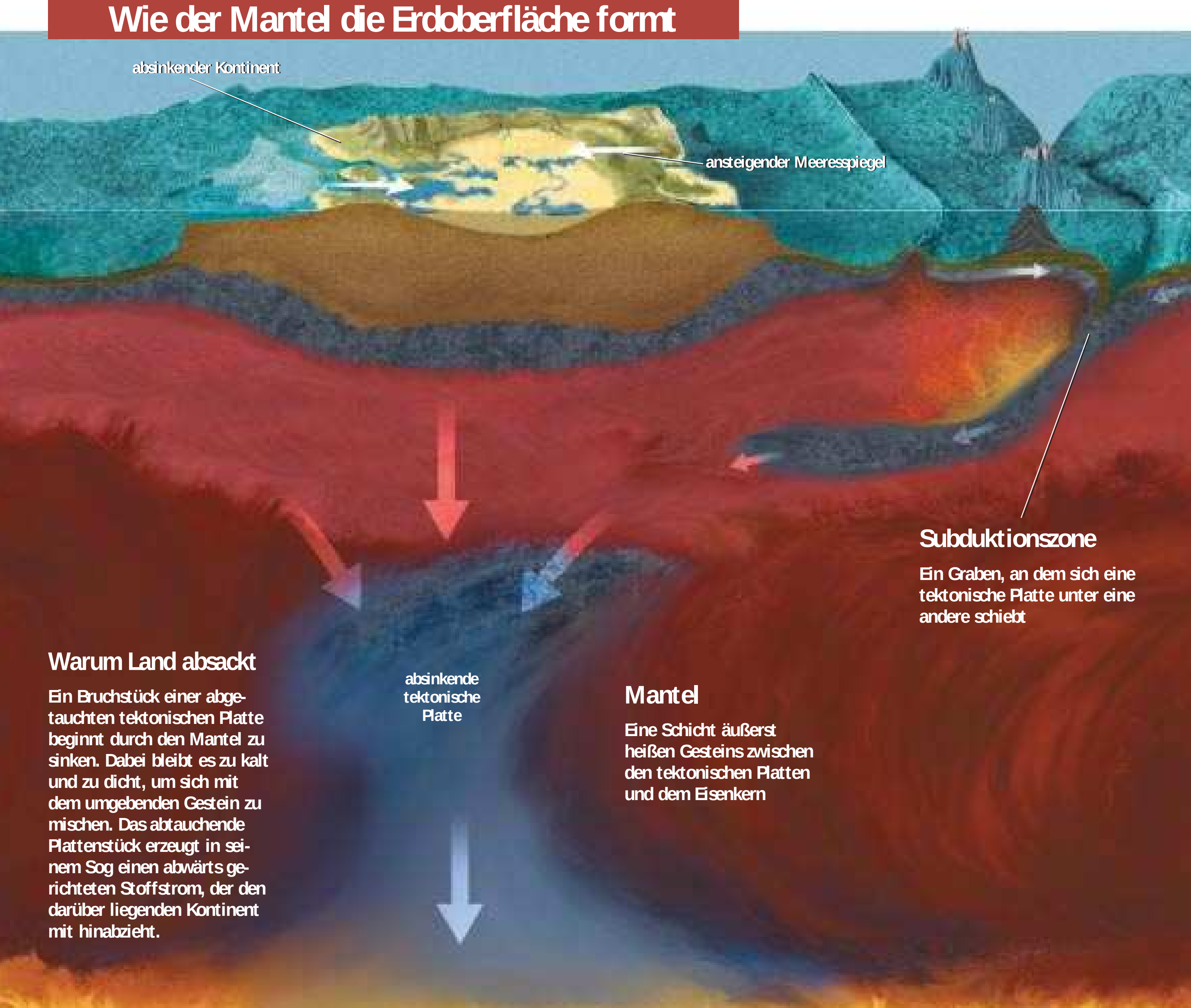
Dennoch bezweifelten die meisten Geologen weiterhin, dass sich Kontinente vertikal bewegen könnten. Sie blieben selbst dann skeptisch, als in den frühen 1970er Jahren erste Hinweise auf ein bi- ▶

zarres Auf und Ab Australiens auftauchten. Bei der Untersuchung alter Gesteinsvorkommen im Osten des Kontinents fand John J. Veevers von der Macquarie-Universität in Sydney heraus, dass in der frühen Kreidezeit (vor etwa 130 Millionen Jahren) ein flaches Meer diese Region binnen kürzester Frist überflutete; andere Kontinente wurden dagegen sehr viel langsamer unter Wasser gesetzt. Andererseits zogen sich die Ozeane in der oberen Kreide (vor etwa 70 Millionen Jahren) bereits wieder von Australiens Küsten zurück, während der Meeresspiegel rund um die übrigen Landmassen seinen Höchststand erreichte. Die frappierende Folgerung: Die Osthälfte des Kontinents muss im Vergleich zu anderen Landmassen um über 300 Meter abgesunken und dann wieder hochgeschnellt sein, bevor der Meeresspiegel weltweit abzusinken begann.

Doch die Geschichte geht weiter. 1978 entdeckte Gerard C. Bond, heute am Lamont-Doherty-Erdobservatorium der Columbia-Universität in Palisades (New York), dass Australien seit dem Ende der Kreidezeit erneut abgesunken ist, diesmal um knapp zweihundert Meter. Dieser Abwärtstrend hält immer noch an. Wie man die Plattentektonik auch dreht und wendet – mit ihr allein ist eine solche Achterbahnfahrt eines Kontinents nicht zu erklären. Eine befriedigende Deutung ergibt sich nur dann, wenn man Hagers Theorie mit einbezieht, wonach der Mantel die Erdoberfläche verbeulen kann.

Den Anstoß zu einer solchen Synthese gab die genaue Untersuchung eines anderen Beispiels für Hebung und Senkung. Ende der 1980er Jahre bewog Bonds Arbeit Christopher Beaumont an der Dalhousie-Universität in Halifax (kanadische Provinz Neuschottland), einer verblüffenden Besonderheit von Denver (Colorado) nachzugehen. Obwohl die Stadt mehr als 1500 Meter über dem Meeresspiegel liegt, besteht ihr Untergrund aus horizontal gelagerten, nicht deformierten marinen Gesteinen. Diese bildeten sich aus Sedimenten, die sich während der Kreidezeit auf dem Grund eines flachen Meeres ablagerten. Zwar bedeckten damals riesige Ozeane große Teile der Kontinente; dennoch lag der Meeresspiegel nur etwa 120 Meter höher als heute. Die See konnte also niemals landeinwärts bis zum jetzigen Denver vorgedrungen sein – es sei denn, die Region hat sich vorher weit über tausend Meter abgesenkt.

Wie der Mantel die Erdoberfläche formt



Subduktionszone

Ein Graben, an dem sich eine tektonische Platte unter eine andere schiebt

Warum Land absackt

Ein Bruchstück einer abgetauchten tektonischen Platte beginnt durch den Mantel zu sinken. Dabei bleibt es zu kalt und zu dicht, um sich mit dem umgebenden Gestein zu mischen. Das abtauchende Plattenstück erzeugt in seinem Sog einen abwärts gerichteten Stoffstrom, der den darüber liegenden Kontinent mit hinabzieht.

Mantel

Eine Schicht äußerst heißen Gesteins zwischen den tektonischen Platten und dem Eisenkern

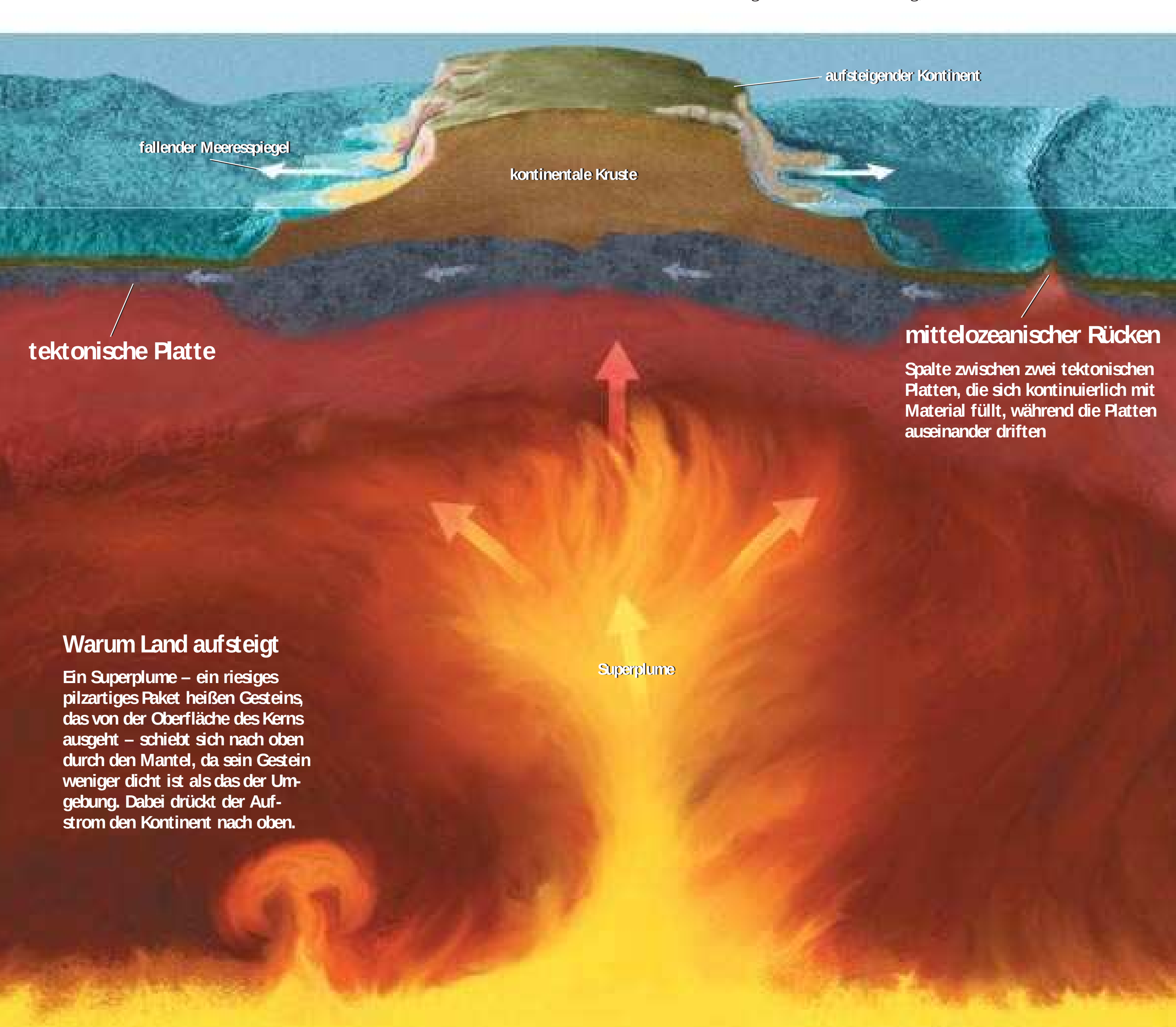
Anhand des Verlaufs der Küstenlinien Nordamerikas in der Kreidezeit schätzte Beaumont, dass diese Absenkung und der nachfolgende Anstieg auf die heutige Höhe ein Gebiet mit einem Durchmesser von rund 1000 Kilometern erfasst hat. Diese gewaltige Ausdehnung aber ist schwerlich mit der Theorie der Plattentektonik vereinbar. Ihr zufolge sind nämlich nur Plattenränder dünn genug, um sich wie eine Angelrute zu biegen, wenn Druck auf sie ausgeübt wird; deshalb können vertikale Bewegungen höchstens bis in etwa 150 Kilometer Entfernung von solchen Rändern stattfinden. Die Bewegung des zentralen Teils Nordamerikas vollzog sich jedoch Hunderte von Kilometern landeinwärts – weitab vom Einfluss jeglicher Plattenkollisionen. Also musste ein völlig anderer Mechanismus dafür verantwortlich sein.

Beaumont wusste, dass im Mantel unter Nordamerika abgetauchte Bruchstücke eines ehemaligen Meeresbodens stecken, die einen Sog nach unten ausüben könnten. Hatte also eine abwärts gerichtete Fließbewegung des Mantels die Delle bei Denver verursacht? Um das zu ergründen, tat sich Beaumont mit Mitrovica, damals noch Student im höheren Semester an der Universität Toronto, sowie Gary T. Jarvis von der York-Universität in Toronto zusammen.

Ursache der Delle bei Denver

Wie die Drei feststellten, schob sich in der Kreide die so genannte Farallon-Platte unter die Westküste Nordamerikas. Computersimulationen zufolge drang sie dabei zunächst fast horizontal in den Mantel ein. Als sie dann abzusinken begann, erzeugte sie in ihrem Kielwasser eine abwärts gerichtete Strömung, die Nordamerika so weit nach unten zog, dass es großenteils unter den Meeresspiegel geriet. Als die Farallon-Platte noch tiefer sank, nahm die Kraft ihres Sogs jedoch ab. Die Tendenz des Kontinents aufzuschwimmen – denn Festland besteht aus Gestein relativ geringer Dichte – gewann so schließlich die Oberhand, und Nordamerika schoss wie ein Korken wieder in die Höhe.

Als die kanadischen Forscher diese Theorie 1989 veröffentlichten, war die Farallon-Platte schon seit Jahrmillionen im Mantel verschwunden. Auf ihre Existenz konnte man also nur auf Grund geologischer Hinweise am Boden des Pazifischen Ozeans schließen. Damals gab es noch keine seismischen Aufnahmen genügend hoher Auflösung, um eine Struktur ▶

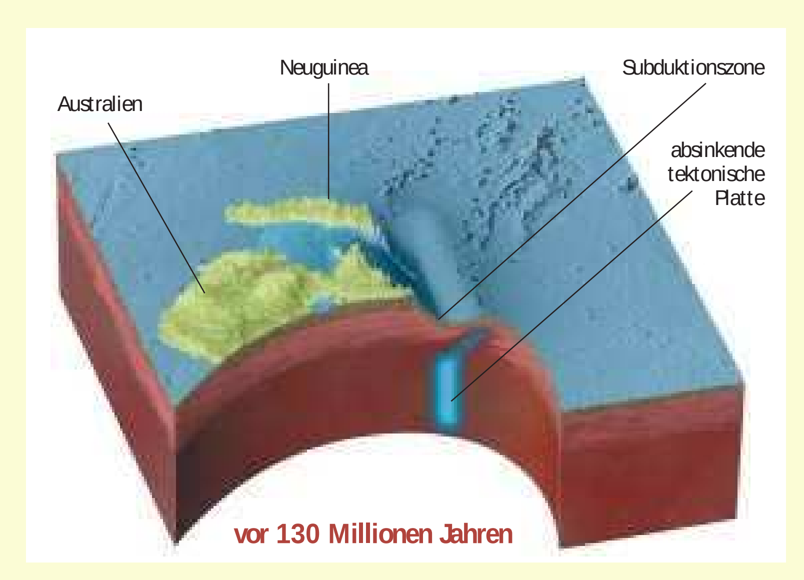


Warum Land aufsteigt

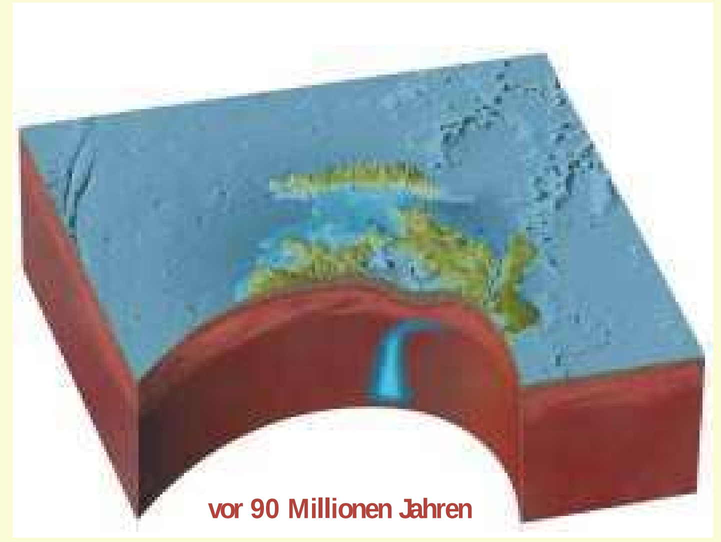
Ein Superplume – ein riesiges pilzartiges Paket heißen Gesteins, das von der Oberfläche des Kerns ausgeht – schiebt sich nach oben durch den Mantel, da sein Gestein weniger dicht ist als das der Umgebung. Dabei drückt der Aufstrom den Kontinent nach oben.

Das Auf und Ab Australiens

Ein Computermodell zeigt, wie der Überrest einer alten Subduktionszone einen Kontinent hinabgezogen hat



Am Ostrand Australiens erstreckt sich eine Subduktionszone – ein tiefer Graben, an dem die angrenzende tektonische Platte (blau) in den Mantel abtaucht. Dabei zieht sie den umgebenden Mantel und den Ostrand Australiens mit nach unten. Später beginnt der gesamte Kontinent nach Osten zu driften.



Die Osthälfte Australiens sinkt etwa 300 Meter unter den Meeresspiegel, als der Kontinent über die subduzierte tektonische Platte hinwegwandert. Vor etwa 70 Millionen Jahren taucht die Platte in den tieferen Mantel ein und verliert dabei ihre Sogwirkung auf die Oberfläche. Der Kontinent beginnt sich deshalb wieder zu heben.

auszumachen, die so klein ist wie ein absinkendes Fragment des Meeresbodens. Doch 1996 präsentierten Stephen P. Grand von der Universität von Texas in Austin und Rob van der Hilst vom Massachusetts Institute of Technology neue Aufnahmen des Mantels. Die beiden Seismologen gehörten nicht nur unterschiedlichen Forschergruppen an, ihre Bilder beruhten auch auf völlig verschiedenen Messreihen. Dennoch zeigten beide praktisch identische Strukturen – insbesondere nach unten geneigte kalte Mantelregionen, die offensichtlich absinkende Bruchstücke einstigen Meeresbodens darstellten: Die bisher nur indirekt erschlossene Farallon-Platte stach in den Bildern als gewölbte Scheibe hervor, die vom Westen der USA bis etwa 1500 Kilometer unter die Ostküste hinabreichte. Sie sitzt genau in dem Streifen verminderter Schwere, den Chase zwei Jahrzehnte zuvor entdeckt hatte.

Die Erkenntnis, dass das Ab- und Auftauchen Nordamerikas etwas mit der Subduktion von Meeresboden zu tun hat, lieferte einen überzeugenden Zusammenhang zwischen Meeresspiegelschwankungen und Vorgängen im Mantel. Damit mußte meiner Meinung nach auch die wiederholte Hebung und Senkung Australiens seit dem Beginn der Kreidezeit zu erklären sein. Über 15 Jahre hatte ich per Computer die Mantelkonvektion simuliert und dabei festgestellt, dass sie sehr wohl in der Lage ist, die Erdoberfläche um weit mehr als tausend Meter zu heben und damit eine scheinbare Absenkung des Meeresspiegels hervorzurufen.

Folglich suchte ich in der bekannten Geschichte der Plattentektonik nach Hinweisen auf Vorgänge im Mantel, die das Auf und Ab des fünften Kontinents verursacht haben könnten. Während der Kreidezeit war Australien mit Südamerika, Afrika, Indien, der Antarktis und Neuseeland zu einem Superkontinent namens Gondwana vereint. Er existierte mehr als 400 Millionen Jahre, bevor er schließlich in die uns vertrauten Landmassen zerbrach. Fast während seiner gesamten Lebensdauer tauchten rund um Gondwana kalte ozeanische Platten in den Mantel ab. Diese Tatsache musste, wie ich glaubte, irgendwie mit dem Auf und Ab Australiens zusammenhängen.

Meine Überzeugung festigte sich, als ich die ehemaligen Subduktionszonen auf Karten alter Plattenkonfigurationen einzeichnete, die der Ozeanograph R. Dietmar Müller von der Universität Sydney erstellt hatte. Die Zeichnungen boten eine Erklärung für die merkwürdigen Vorgänge in Australien. Demnach wäre der Kontinent, als die alte Subduktionszone Gondwanas schließlich absank, direkt über sie hinweggedriftet.

Um diese Vermutung zu überprüfen, musste ich herausfinden, was mit der kalten Platte im Mantel während der vielen Jahrmillionen geschah, in denen Gondwana auseinanderbrach. Wie wirkte sie sich auf Australien aus? Auf der Suche nach einer Antwort zogen Müller und ich gemeinsam mit Louis Moresi von der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in Perth wiederum eine Computersimulation heran. Wir kannten die ursprüngliche Position der alten Subduktionszone, die Geschichte der horizontalen Plattenbewegungen in der Region und die mutmaßlichen Eigenschaften – etwa die Viskosität – des darunter liegenden Mantels. Mit diesen Vorgaben

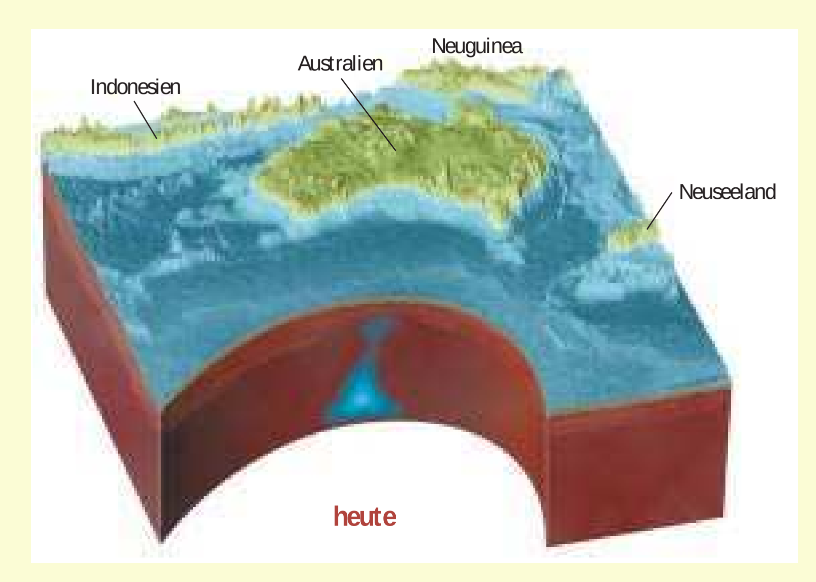
Literaturhinweise

Dynamics of Cretaceous Vertical Motion of Australia and the Australian-Antarctic Discordance. Von M. Gurnis, R. D. Müller und L. Moresi in: Science, Bd. 279, S. 1499, 6.3.98.

Dynamic Earth: Plates, Plumes and Mantle Convection. Von Geoffrey F. Davies. Cambridge University Press 2000.

Constraining Mantle Density Structure Using Geological Evidence of Surface Uplift Rates: The Case of the African Superplume. Von M. Gurnis et al. in: Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Bd. 1, Paper Nr. 1999GC000035 (2000).

*Weblinks zum Thema finden Sie unter **www.spektrum.de***



Australien ist in den letzten rund 45 Millionen Jahren von angrenzenden tektonischen Platten ein gutes Stück nach Norden geschoben worden und dabei fast 200 Meter abgesunken. Diese neuerliche Abwärtsbewegung war die Folge eines nach unten gerichteten Zugs im Mantel unter Indonesien – jener Landmasse, die sich derzeit weltweit wohl am schnellsten senkt.

erstellte der Computer ein Szenario für Australien, das sich fast perfekt mit unseren Hypothesen deckte (siehe Kasten).

Das Computermodell startete vor 130 Millionen Jahren mit dem Abtauchen von Meeresboden unter den Osten Australiens. Nach der Trennung von Gondwana wanderte der Kontinent über das kalte, absinkende Fragment und wurde von ihm nach unten gezogen. Als er sich bei der weiteren Drift nach Osten von dem Fragment entfernte, stieg er wieder auf.

Indonesien zieht Australien mit in die Tiefe

Damit erklärte unser Modell die rätselhafte Bewegung Australiens während der Kreidezeit, die Veevers erstmals beobachtet hatte. Wie aber kam es zu dem späteren erneuten Absinken des gesamten Kontinents um knapp 200 Meter, das Bond entdeckte? Wie sich zeigte, hängt die Antwort damit zusammen, dass Australien seit dem Ende der Kreidezeit nordwärts Richtung Indonesien gleitet.

Auf diese Erkenntnis brachte uns die Zusammenarbeit mit der Geophysikerin Carolina Lithgow-Bertelloni, die inzwischen an der Universität von Michigan in Ann Arbor tätig ist. Sie hat ein globales Modell des Mantels entwickelt, das die Geschichte der Subduktion berücksichtigt. Ihm zufolge wird Indonesien derzeit so stark abwärts gesaugt wie keine andere Erdregion. Der Grund ist vermutlich, dass es an der Schnittstelle ausgedehnter, noch immer aktiver Subduktionssysteme im Pazifischen und Indischen Ozean liegt. Tatsächlich ist Indonesien ein riesiger abgetauchter Kontinent, von dem heute nur noch die höchsten Erhebungen aus dem Meer ragen. Und während es absinkt, zieht es Australien mit in die Tiefe.

Damit kommen wir zurück zu Afrika. In gewissem Sinn ist es der Gegenpol zu Indonesien: Das asiatische Inselreich wird hinabgezogen, der schwarze Kontinent dagegen hochgedrückt. Beides hat viel mit dem einstigen Gondwana zu tun. Der breite Streifen geringer Schwere, den Chase vor dreißig Jahren entdeckte, wird durch die immer noch absinkenden Platten jener gigantischen Subduktionszone erzeugt, die einst den Superkontinent umgab. Das südliche Afrika lag im Zentrum Gondwanas. Daher wurde der Mantel darunter weder damals noch in den Jahrmillionen seither von abtauchenden ozeanischen Platten gekühlt. Und so heizte er sich allmählich auf. Das erklärt, warum heute ein rießiger Pilz heißen Gesteins – ein so genannter Superplume – tief unter Südafrika emporsteigt.

All diese Erkenntnisse machen deutlich, dass die Stoffströme im Mantel das Antlitz der Erde in mehr als einer Hinsicht prägen. Sie sind nicht nur ein wichtiger Motor der Plattendrift, sondern heben und senken auch riesige Landmassen. Und was die vielleicht aufregendste Entdeckung ist: Die Bewegung im tiefen Mantel hinkt hinter der horizontalen Wanderung der tektonischen Platten her. Deshalb können einstige Plattengrenzen noch Jahrmillionen später beeinflussen, wie sich die Erdoberfläche an dieser Stelle verbeult.

Mit neuen Methoden zur Beobachtung des Mantels und zur Simulation seines Bewegungsmusters werden wir die Dynamik der Mantelkonvektion und Plattentektonik immer besser verstehen. Wie erwähnt, wirkt sich jede Veränderung der Stoffströme in der Tiefe auf das Gravitationsfeld aus. Seine Schwankungen zu verfolgen gehört deshalb zu den Zielen einer deutsch-amerikanischen Raumfahrtmission namens GRACE, für die im Juni der Startschuss fallen soll. Zwei Raumfahrzeuge, die hintereinander in der selben Umlaufbahn kreisen, werden alle zwei Wochen neue Schweredaten liefern und so vielleicht indirekte Aufschlüsse über die langsamen vertikalen Strömungen geben, die von der Konvektion im Mantel herrühren.

Desgleichen dürften seismische Aufnahmen mit noch höherer Auflösung einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, das momentane Geschehen im Mantel zu enthüllen. Diesem Zweck dient das Projekt USArray, das über fünf bis zehn Jahre laufen soll. Geplant ist, dass 400 bewegliche Seismometer den Erdmantel bis in gut tausend Kilometer Tiefe durchleuchten und dabei noch Strukturen von 80 Kilometern Durchmesser auflösen.

Aufnahmen und Vermessungen des Mantels in bislang unerreichter Qualität sind bereits für das kommende Jahrzehnt geplant. In Verbindung mit noch leistungsfähigeren Computern versprechen sie enorme Fortschritte bei der Aufklärung der dynamischen Prozesse im Erdinneren. Die größte zusammenhängende Region des Planeten – den Mantel – als Gesteinsmasse mit einer geologischen Geschichte zu betrachten, hat sich bereits als höchst fruchtbarer Ansatz erwiesen. Von ihm darf man sich weitere Durchbrüche im Verständnis der letzten Ursachen aller geologischen Prozesse erwarten. ■

Michael Gurnis *interessiert sich für die physikalischen Prozesse, welche die Entwicklung unseres Planeten steuern, seit er vor zwanzig Jahren mit dem Geologiestudium begann. Mit seinem Forschungsteam am California Institute of Technology in Pasadena entwickelt er Computerprogramme zur Simulation der Strömungsprozesse im Erdmantel und ihrer Auswirkungen auf die Gestalt der Erdoberfläche.*



In bunter Vielfalt bewohnen kleine Leguane der Gattung Anolis die Großen Antillen. Jede Art macht sich einen bestimmten Teil der Umwelt zu eigen. Das Dach der Bäume etwa beherrschen stets recht große Echsen. Im Gras leben zierliche Arten mit besonders langem Schwanz.



Wenn die Evolution sich wiederholt

Die Großen Antillen wimmeln von verschiedensten Echsen der Gattung Anolis. Erstaunlicherweise wohnen auf allen Inseln des Archipels sehr ähnliche Typen. Und doch entstanden diese Arten unabhängig voneinander. Offenbar hat die Evolution hier immer wieder gleiche Lösungen hervorgebracht.

Anolis cybotes

olis pulchellus

Von Jonathan B. Losos

Die Großen Antillen in der Karibik verwöhnen nicht nur Urlauber. Auch Biologen kommen hier auf ihre Kosten. Überall auf den subtropischen Inseln huschen kleine, schlanke Echsen in vielerlei Farben, Gestalten und Größen. Viele wirken zart wie Eidechsen. Den größeren sieht der Fachmann schon eher an, dass sie alle zu den Leguanen gehören.

Die blauen, braunen, grünen oder grauen „Eidechsen“ scheinen hier an allen erdenklichen Orten zu wohnen: in Baumkronen, an Baumstämmen, im Laub unter den Bäumen, auf Zaunpfählen oder zwischen Blumen. Manche können hervorragend springen, andere ausgesprochen schlecht. Einige wirken geradezu dreist, manche geben sich vorsichtig oder scheu.

Trotz ihrer Vielfalt sind alle diese Arten biologisch nah miteinander verwandt. Die Systematiker ordnen sie sogar in dieselbe Leguangattung „Anolis“. Diese wissenschaftliche Bezeichnung haben Terrarienfreunde übernommen. Der deutsche Name „Saumfinger“ – an einigen Finger- und Zehengliedern tragen diese kleinen Echsen hakenbesetzte Haftpolster – war ihnen wohl zu umständlich. Evolutionsforscher können sich kaum bessere Studienobjekte wünschen als diese Anolis-Echsen der Großen Antillen. Ihre enorme Artenzahl verlockt dazu, an ihrem Beispiel eines der großen Rätsel der Biologie zu untersuchen – die Frage, weshalb die Evolution im einen Fall diesen Weg nimmt, im anderen jenen. ▶

Jonathan B. Losos ist an der Washington University in Saint Louis (Missouri) Professor für Biologie. Er leitet dort auch das Tyson–Forschungszentrum.

Wer die Anolis-Echsen auf den Antillen beobachtet, merkt bald: Wenn mehrere ihrer Arten eng beieinander leben, beispielsweise bei Bäumen, dann nutzen sie unterschiedliche Teile dieser Umwelt. Sie besetzen also verschiedene Habitate beziehungsweise nehmen andere „ökologische Nischen“ ein. In einer solchen Anolis-Gemeinschaft hält sich zum Beispiel eine Art nur im Gras auf, eine andere siedelt nur auf Zweigen. Eine dritte etwa lebt am Sockel der Bäume und wagt sich von dort manchmal auch auf den Boden. Diese drei Arten sehen auch verschieden aus. Die Anolis des Grases wirkt ausgesprochen zartgliedrig und besitzt einen sehr langen, dünnen Schwanz. Die Echse von den Zweigen erscheint ebenfalls sehr schlank, doch sie hat kürzere, stämmigere Beine. Die Bewohnerin des Baumsockels sieht im Vergleich dazu recht kräftig bis stämmig aus und hat auffällig lange Beine.

Spezialisten zum Verwechseln

Das Besondere an den Anolis-Arten ist aber nicht diese Aufteilung in ökologische Nischen. Denn verwandte Tierarten grenzen sich fast immer deutlich voneinander ab, wenn sie irgendwo zusammen vorkommen. Das wohl bekannteste Beispiel stellen die Darwinfinken der Galapagosinseln dar, die viele spezielle „Berufe“ ausüben. Ein anderes Beispiel bilden die Lemuren Madagaskars. Auch ihre vielen Arten, von denen Wissenschaftler immer noch neue entdecken, nutzen verschiedenste Lebensnischen.

An den karibischen Anolis-Arten ist vielmehr ungewöhnlich, dass die Riege der Spezialisten einander von Insel zu Insel beinahe zum Verwechseln ähnelt. Jeweils auf mehreren Inseln treten fast genau die gleichen Typen auf. Nicht nur die Zweige bewohnende Anolis-Art von Puerto Rico sieht so aus und verhält sich genauso wie die von Kuba – und die von Jamaika und von Hispaniola (mit den Staaten Haiti und Dominikanische Republik). Auch auf den Sockelbereich der Bäume haben sich auf jeder dieser Inseln vier Arten in gleicher Weise spezialisiert. Auf jeder Insel lebt zudem eine ähnliche Art, die höher im Baum zu Hause ist. Und den Kronenbereich beherrscht jedes Mal eine auffallend große Anolis-Form. Außerdem kommt auf drei der Inseln eine typische Gras-Bewohnerin vor. Und auf zweien ist je eine Art rein auf Baumstämmen heimisch. Diese Echsen besitzen im Vergleich zu den Tieren des Sockels einen flacheren Körper und kürzeren Schwanz.

Dass sich Tierarten in verschiedenen Gegenden der Welt an ähnliche ökologische Nischen angepasst haben und dann oft auch äußerlich ähneln, selbst wenn sie zu völlig anderen systematischen Gruppen gehören, ist an sich für Biologen nichts Neues. Die Wissenschaftler sprechen dann von „konvergenter Anpassung“ oder „Konvergenz“ dieser Arten. Zum Beispiel erinnern viele australische Beuteltiere, darunter zahlreiche ausgestorbene, in Körperform und Umweltansprüchen tatsächlich so stark an Tiere der Alten Welt, dass die Europäer ihnen Namen gaben wie Beutelwolf, Beutellöwe oder Beutelmarder. Ungewöhnlich ist auch noch nicht einmal, dass gleich mehrere Arten sich die Umwelt ähnlich aufteilen wie eine völlig andere Gruppe von Tieren an einem anderen Ort. Doch bei den Anolis-Echsen der Großen Antillen gleichen sich sogar die Artengemeinschaften zum Verwechseln. Dies dürfte einzigartig sein und fordert eine Erklärung.

Wie waren diese Spezialisten entstanden? Hatten sie sich überhaupt auf jeder Insel selbstständig entwickelt? Das wäre tatsächlich etwas Besonderes. Oder kam jeder Typ ein einziges Mal auf und verbreitete sich dann über die anderen Orte? Möglich wäre ja, dass die kleinen Reptilien einst bereits als Spezialisten von einer der Inseln zu den anderen drifteten, vielleicht mit Treibholz oder bei einem Wirbelsturm. Nach einer anderen These könnten manche spezialisierten Formen schon vor langer Zeit entstanden sein, als einige der Inseln möglicherweise noch zusammenhingen. Als diese später auseinander fielen, hätten sich die Nachkommen zwar zu eigenen Arten entwickelt, aber ihre alten Anpassungen beibehalten. Falls die einander verblüffend gleichenden Lebensgemeinschaften aber unabhängig voneinander entstanden wären, sollte man dies nachweisen können. Es müsste etwas geben – irgendeinen deterministischen Prozess –, der die Evolution dieser Tiere jedes Mal in dieselbe Richtung drängt.

Verwandtschaftsanalysen mit genetischen Tests

Ob das der Fall ist, wollten meine Kollegen und ich untersuchen. Dazu hatten wir drei Grundannahmen zu prüfen. Wir müssten zeigen,

➤ dass die Habitatspezialisten auf jeder Insel für sich, also jedes Mal neu, evolviert sind, außerdem,

➤ dass die einzelnen Arten tatsächlich an ihre jeweilige ökologische Nische angepasst sind, und vor allem auch,

➤ dass auf jeder der Inseln ähnliche ökologische und evolutionäre Faktoren herrschen.

Für solche Studien stehen den Evolutionsbiologen heute viel mehr Methoden zur Verfügung als noch vor zwanzig Jahren. Wir können uns dabei auch auf das Know-how etlicher anderer Wissenschaftsdisziplinen stützen. Zu unserer Fragestellung untersuchten wir beispielsweise Fossilien, führten Feldstudien durch, machten mit den Echsen gezielte Experimente im Freiland und im Labor und analysierten ihr Erbgut.

Zur Klärung der Verwandtschaftsverhältnisse mussten wir den Stammbaum der karibischen Anolis-Arten konstruieren. Falls – im Extrem – alle Spezialisten eines Typs miteinander enger verwandt wären als mit den anderen Arten ihrer Insel, dann stammten sie sicherlich von

Steckbrief

Anolis („Saumfinger“): Diese artenreiche Gattung der Leguane lebt in tropischen und subtropischen Regionen Amerikas. Manche dieser schlanken Reptilien mit auffällig langem Schwanz werden über einen halben Meter lang. Andere messen unter zehn Zentimeter. Allein auf den Großen Antillen kommen rund 110 Arten vor.

Evolution: In der Stammesgeschichte verändern und entwickeln Organismen ihre Anpassungen an Umweltgegebenheiten. Die „Natürliche Auslese“ oder „Selektion“ als Mechanismus zur Bewertung von Anpassungen gilt als wesentlicher Evolutionsfaktor.

Ökologische Nische: Jede biologische Art nimmt in ihrer Umwelt einen bestimmten Platz ein und erfüllt bestimmte Funktionen.

Konvergenz: In verschiedenen Entwicklungslinien entstehen unter ähnlichen Umweltbedingungen unabhängig voneinander manchmal ähnliche Merkmale.

Phänotypische Plastizität: Einen Organismus („Phänotyp“) formen nicht nur seine Gene (sein „Genotyp“), sondern auch seine Umwelt. Auch Körpermerkmale können sich umweltbedingt unterscheiden.

Arten-Rätsel in der Karibik



Zum Verwechseln ähnlich erscheinen diese vier Anolis-Arten von den Großen Antillen, die Zweige bewohnen. Sie leben jedoch auf verschiedenen Inseln.

einem gemeinsamen Vorfahren ab, der auch schon in gleicher Weise angepasst war wie sie. Dann wäre dieser Typ in der Evolution nur einmal entstanden, und die Zweigbewohnerin von Jamaika stünde der Zweigbewohnerin von Kuba oder Puerto Rico näher als der Jamaika-Art, die an Baumsockeln lebt. Wären umgekehrt die Arten der Inselgemeinschaften besonders nah miteinander verwandt, müsste jeder Typ mehrfach unabhängig entstanden ein (siehe Bilder oben). Jetzt hätte die Zweigbewohnerin von Jamaika als nächste Verwandte die anderen Jamaika-Arten, obwohl diese ganz anders leben.

Um die Verwandtschaftsverhältnisse zu klären, verglichen wir von über fünfzig Anolis-Arten mehrere Sequenzen des Erbguts. Zu dem Team, das bei dieser Analyse mitarbeitete, gehörten unter anderem Todd R. Jackman (der jetzt an der Villanova University in Pennsylvania arbeitet), Allan Larson von der Washington University in Saint Louis (US-Bundesstaat Missouri) und Kevin de Queiroz von der Smithsonian Institution in Washington. Wie man aus solchen Sequenzvergleichen Stammbäume herleitet, ist zwar noch teilweise umstritten. Doch sind sich die Forscher insoweit einig, dass ähnlichere genetische Sequenzen meistens engere Verwandtschaft bedeuten. Menschen und Schimpansen ähneln einander genetisch mehr als Menschen und Paviane. Folglich haben wir mit Schimpansen einen näheren gemeinsamen Vorfahren als mit Pavianen.

Das Ergebnis unseres Vergleichs war eindeutig: Die Anolis-Arten der Großen Antillen mit gleicher ökologischer Nische sind untereinander nicht besonders eng verwandt. Vielmehr dürften die Spezialisten der verschiedenen Inseln unseren Daten zufolge jeweils neu entstanden sein. Demnach entwickelten sich auch die Artengemeinschaften auf jeder Insel getrennt, unabhängig voneinander.

Lange Beine im Experiment

Über die Evolution dieser Echsen selbst könnten Fossilien Aufschluss geben. Die meisten uns zugänglichen sind allerdings erst wenige tausend Jahre alt. An wirklich alten Fossilien von Anolis stehen der Wissenschaft leider nur vielleicht ein Dutzend Exemplare zur Verfügung. Denn die sehr alten Fossilien sind alle in Bernstein eingeschlossen, also in fossilem Harz. Und solche Bernsteinstücke mit Inklusen sind begehrte Sammlerobjekte und finden selten den Weg in die Forschung. Immerhin gelang es uns, zwei zwanzig Millionen Jahre alte Anolis-Fossilien von Hispaniola zu untersuchen. Wir können sie von heutigen Arten praktisch nicht unterscheiden. Beide sehen wirklich genauso aus wie die heutigen Baumkronen-Arten. Die Aufgliederung auf bestimmte Habitate muss bei der Gattung Anolis demnach schon sehr früh stattgefunden haben.

Inwieweit die körperlichen Unterschiede der einzelnen Anolis-Arten wirklich Anpassungen an spezielle Umwelten darstellen, prüften wir in einer Reihe von Experimenten, aber auch in Felduntersuchungen. Unter anderem testeten wir die Auswirkungen der Beinlänge. Die Zweige bewohnenden Arten der Karibik besitzen recht kurze Beine, die Arten vom Baumsockel auffallend lange.

Zuerst testeten wir im Labor, wie schnell die Echsen rennen können, wie weit sie maximal springen oder wie gut sie sich auf senkrechtem Untergrund ▶

festhalten. Beispielsweise bauten wir für die Tiere eine zwei Meter lange, schmale Rennbahn, an der entlang wir alle Viertel Meter eine Lichtschranke mit Infrarotlicht positionierten. Setzten wir eine Echse an das eine Ende, flitzte sie gleich zum dunklen Sack an der anderen Seite, und wir registrieren die Geschwindigkeit. In anderen Versuchen mussten die Tiere sich an einer speziellen senkrechten Messplatte halten, während wir sie nach unten zu ziehen trachteten. Über die Messplatte registrierten wir die Kraftentwicklung an den Zehenpolstern.

Andere Versuche waren technisch einfacher. Die maximale Sprungweite maßen wir, indem wir die kleinen Echsen von einem dreißig Zentimeter hoch angebrachten flachen Brett springen ließen. Sie machten das, wenn wir am Schwanz tippten.

Strategen in ihrer Umwelt

Unsere Ergebnisse entsprachen weitgehend den Erwartungen. Berücksichtigt man die unterschiedlichen Körpergrößen, sprinten die langbeinigen Anolis schneller und springen weiter als die kurzbeinigen Vertreter. Und wer die größeren Zehenpolster aufweist, kann sich gegen Widerstand besser festhalten.

Dennoch überraschten uns einige Resultate. So stellten wir fest, dass die langbeinigen Echsen am schnellsten auf einer breiten Fläche flitzen. Auf einem schmalen Stab oder Zweig bringen die langen Beine den Tieren anscheinend keinen Vorteil. Zum Beispiel können Vertreter der puerto-ricanischen Art *Anolis gundlachi*, die am Sockel von Bäumen lebt, auf ebener Fläche zwar doppelt so schnell rennen wie Exemplare der jamaikanischen Zweigbewohnerin *Anolis valencienni*. Der Unterschied verringert sich aber deutlich mit abnehmender Breite des Untergrunds. Auf einem einen Zentimeter dünnen Stab laufen Tiere beider Arten gleich langsam. Die kurzbeinigen Echsen haben zudem den Vorteil, sich überall, ob auf einem dünnen Zeig oder dicken Ast, sehr sicher bewegen zu können. Die langbeinigen dagegen treten auf einem schmalen Grat öfter daneben und fallen auch manchmal herunter.

Diese Befunde könnten zwar wirklich bedeuten, dass die äußerlichen Unterschiede der Anolis-Arten Anpassungen an Umweltnischen darstellen. Doch muss man sich vor vorschnellen Schlüssen hüten: Es kommt darauf an, ob die Echsen den körperlichen Vorteil in ihrem Leben tatsächlich nutzen. Hierzu liegen inzwischen genaue Feldstudien vor, die im Wesentlichen mein früherer Mitarbeiter Duncan Irschik durchführte, der jetzt an der Tulane University von Louisiana in New Orleans arbeitet. Dabei kam zu unserem Erstaunen heraus, dass auch die langbeinigen Anolis-Arten so gut wie nie so weit springen, wie sie könnten. Meistens bleiben sie deutlich darunter. Auf ein besonders gutes Sprungvermögen kam es in ihrer Evolution offenbar nicht an.

Literaturhinweise

Anolis. Von Axel Fläschendräger und Leo Wijffels. Natur und Tier-Verlag, Münster 1996.

Contingency and Determinism in Replicated Adaptive Radiations of Island Lizards. Von J. B. Losos et al. in Science, Bd. 279, S. 2115, 27. März 1998.

Weblinks zum Thema finden Sie unter ***www.spektrum.de***

Aber die Tiere rennen in der Natur oft mit höchster Geschwindigkeit – besonders auf der Flucht vor einem Raubfeind. Hierin nun unterscheiden sich die Arten deutlich im Verhalten. Die Anolis mit den längsten Beinen sieht man am häufigsten flitzen. Die kurzbeinigen Arten machen das dagegen selten. Vielmehr bewegen sie sich gern langsam schleichend – auch das ist eine gute Strategie, von Feinden oder Beutetieren nicht gesehen zu werden, zumal im dichten Gezweig. Für diese Arten ist auch ihre Trittsicherheit besonders wichtig. Ein strauchelndes Tier ist immer in Gefahr, gesehen zu werden.

Übung oder Gene – was bestimmt die Wege der Evolution?

Gewöhnlich finden Anpassungen in der Evolution über so lange Zeiträume statt, dass ein Menschenleben nicht ausreicht, der natürlichen Auslese bei der Arbeit zusehen zu können. Einen winzigen Blick erhaschten wir aber doch – dank eines Experiments aus den siebziger Jahren, das Thomas und Amy Schoener von der Universität von Kalifornien in Davis ersonnen. Die Schoeners hatten beobachtet, dass auf einigen winzigen Bahamas-Inseln keine Anolis-Echsen vorkommen. Sie wollten herausfinden, weshalb diese Tiere dort offenbar nicht überleben können. Darum setzten die Forscher eine in der Karibik verbreitete relativ kleine Art, die Braune oder Bahamas-Anolis (*Anolis sagrei*), auf zwanzig dieser Inseln aus. Unerwarteterweise gediehen die Echsen-Populationen gut, nur mit Ausnahme der kleinsten Inseln – bis zum Jahr 1996: Da fegte ein Hurrikan manche Eilande wieder leer. Die Schoeners hatten so etwas vermutet.

Meine Mitarbeiter und ich suchten einige dieser Inseln 1991 auf. Uns interessierten die eingeführten Anolis-Populationen, weil auf einem Teil der Inseln Bäume mit einem ziemlich kräftigen Stamm wachsen und auf anderen nur spärliche Büsche. Vielleicht hatten die Echsen sich ja mittlerweile etwas an die örtlichen Verhältnisse angepasst. Lebten auf den Inseln mit Bäumen, die breite

Zwei Konkurrenz-Stammbäume



Anolis-Arten mit gleicher ökologischer Nische könnten im Extrem alle von demselben Spezialisten abstammen (links). Wie jedoch genetische Analysen zeigen, sind die Arten jeder Insel der Großen Antillen am engsten untereinander verwandt. Demnach entstanden die spezialisierten Typen unabhängig voneinander jedes Mal aufs Neue – und auch in jeweils etwas anderer Reihenfolge (rechts).

LAURIE GRACE



ZIG LESZCZYNSKI / OKAPIA

Diese Jamaika-Anolis oder Riesenanolis (*Anolis garmani*) der Baumkronen überraschte der Fotograf nach der Häutung.

Flächen boten, etwa schon Tiere mit ein wenig längeren Beinen? Und siedelten im Gestrüpp der kargeren Inseln bereits Echsen mit etwas kürzeren Beinen? Zu unserer Freude fanden wir dies bestätigt. Zwar betrug der Unterschied in der Beinlänge gerade ein paar Millimeter, aber er war doch deutlich erkennbar.

Die Tiere hatten sich offenbar rasch besser an die neue Umwelt angepasst. Trotzdem mussten wir mit unserer Deutung des Befundes vorsichtig sein. Wir konnten nämlich nicht sicher wissen, dass wirklich Evolution am Werke gewesen war. Biologen kennen von Säugern und Vögeln auch das Phänomen, dass intensiver beanspruchte Knochen etwas stärker wachsen. Dazu müssen sich die Tiere genetisch gar nicht unterscheiden. Auch bei Tennisprofis ist der Schlagarm länger als der andere Arm. Sie haben schon als Kind täglich stundenlang Bälle geschlagen.

Wir wollten herausfinden, ob wir das Beinwachstum der Anolis-Echsen durch entsprechende Umwelten forcieren konnten. Mehrere meiner Kollegen halfen dabei, als wir junge Braune Anolis im Zoo von St. Louis in verschieden eingerichteten Terrarien aufzogen. Einige Behältnisse enthielten sieben Millimeter dünne Holzstäbchen. Andere Tiere konnten auf Brettchen herumlaufen (Seite 42 oben). Trotz allem staunten wir, was dabei herauskam: Den Tieren mit den Brettchen wuchsen wirklich etwas längere Beine als den anderen. Der Unterschied war zwar längst nicht so groß wie bei den Anolis-Arten auf den Großen Antillen, die auf Zweige beziehungsweise Baumsockel spezialisiert sind. Diese Arten erben ihre Beinlänge sicherlich. Aber bei jenen Populationen, die auf den kleinen Inseln ausgesetzt wurden, könnten die Unterschiede auf die Umwelt zurückgehen. Um das zu klären, planen wir nun die gleichen Aufzuchtexperimente mit Braunen Anolis aus Populationen von den künstlich besiedelten Inseln, deren Mitglieder verschieden lange Beine haben. So wollen wir herausfinden, ob die Unterschiede in der Beinlänge bereits zum Teil genetisch fixiert sind oder nicht.

Der Evolution voraus

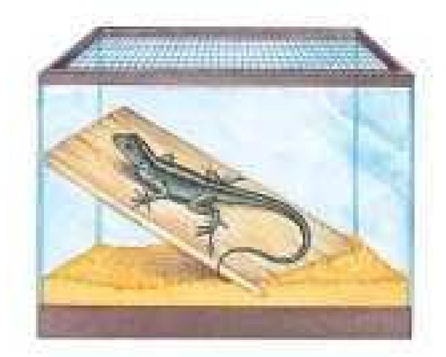
Wenn Tiere sich während ihres Lebens an ihre Umwelt anpassen können, nennen Biologen dies „phänotypische Plastizität". („Phänotyp" heißt das Erscheinungsbild des Organismus, das zugleich auf Erb- und Umwelteinflüssen beruht.) Seit einigen Jahren diskutieren Evolutionsforscher verstärkt, ob eine solche Plastizität möglicherweise auch für die Evolution wichtig ist. Manchmal kann eine Population eine bestimmte Umwelt anfangs vielleicht nur dank dieser Eigenschaft nutzen. Wenn ihre Mitglieder anders aussehen oder sich anders verhalten als ihre Artgenossen in einer anderen Umwelt, muss das nicht von vornherein auf erblichen Unterschieden beruhen. Doch irgendwann werden genetische Mutationen hinzukommen. Darunter können Zufallstreffer sein, dank derer einige Tiere in der betreffenden Umwelt noch besser zurechtkommen als vorher. Damit setzt auch ein evolutionärer Wandel ein. Und schließlich, genügend Zeit vorausgesetzt, entsteht eine neue Art, die wie für diesen Lebensraum gemacht scheint. Phänotypische Plastizität könnte den Weg dazu ebnen. Diese Vorstellung kam schon vor über fünfzig Jahren auf. Aber erst heute erhält sie ernsthafte Beachtung.

Das letzte Teil in unserem Anolis-Puzzle betrifft die Frage, warum die Spezialisierungen überhaupt entstanden. Ein mögliches Szenario dafür wäre, dass anfangs zwei nicht spezialisierte Arten aufeinandertrafen. Zum Beispiel könnte die eine auf der Insel schon gelebt haben, als die zweite dort eintraf. Die beiden Arten waren nach diesem Szenario zunächst wahrscheinlich Nahrungskonkurrenten, denn die meisten Anolis-Arten fressen vielerlei: alle möglichen Insekten und mitunter auch Früchte und kleine Wirbeltiere. Sie konnten diese Konkurrenz aber entschärfen, indem sie verschiedene Habitate nutzten und unterschiedliche Beute jagten. Durch Wirkung der natürlichen Auslese, welche noch bessere Anpassungen an die beiden Umwelten begünstigte, entstanden mit der Zeit Tiere, die hervorragend in diese verschiedenen Nischen passten.

Ob das in der Evolution so ablief, wissen wir nicht. Wir können aber sehr wohl feststellen, ob zwischen heutigen Anolis-Arten Konkurrenz auftritt. Tatsächlich lassen zahlreiche Feldstudien diesen Verdacht aufkommen. Auf den ▶

Experiment zur individuellen Anpassungsfähigkeit





Braune Anolis (Bahamas-Anolis oder *Anolis sagrei*) bekommen relativ kurze Beine, wenn sie zum Klettern und als Ansitz nur dünne Stöcke zur Verfügung haben. Allerdings wachsen die Beine von Tieren, die auf Brettern sitzen und laufen können, nur ein paar Millimeter länger. (Die Größenverhältnisse sind hier nicht streng wiedergegeben.)

ROBERTO OSTI

Bahamas zum Beispiel nutzt die Braune Anolis (*Anolis sagrei*) dort, wo ihre Art als einzige vorkommt, höhere und auch unterschiedlichere Bereiche der Bäume als in Gegenden, in denen noch mehr Anolis-Arten leben. Zwingen nun diese anderen Arten – die stärker auf das Baumleben spezialisiert sind als die Braune Anolis – tatsächlich ihre Konkurrentin, diese Bereiche eher zu meiden und sich auf andere zu orientieren? Oder unterscheiden sich vielmehr die beiden Lebensräume, in denen nur die eine und in denen mehrere Arten existieren?

Mit zwei anderen Anolis-Arten haben wir dazu im puerto-ricanischen Regenwald Experimente durchgeführt. Die eine, *Anolis gundlachi*, lebt an Baumsockeln, die andere, *Anolis evermanni*, in Baumkronen. Meine Studenten Manuel Leal und Javier A. Rodríguez-Robles (die jetzt am Union College in New York beziehungsweise an der Universität von Kalifornien in Berkeley arbeiten) und ich fingen auf drei 20 mal 20 Meter großen Parzellen alle Baumsockel-Echsen weg. Zum Vergleich steckten wir drei ähnliche gleichgroße Parzellen ab, in denen wir beide Arten in Ruhe ließen. Acht Wochen später ermittelten wir die Bestandsdichten der Baumkronenart. Wir stellten eine höhere Dichte fest, wenn die Baumsockel-Art fehlte. Offensichtlich hatte die Baumkronen-Echse von unserem Eingriff profitiert.

Ein ähnliches Ergebnis brachte ein Freilandexperiment auf den Bahamas mit den schon mehrfach erwähnten Braunen Anolis (*Anolis sagrei*) und Rotkehl-Anolis (*Anolis carolinensis*, auch Grüne Anolis genannt). Auf einigen kleinen Inseln leben dort beide Arten nebeneinander. David Spiller von der Universität von Kalifornien in Davis und ich setzten auf ein paar winzigen Anolis-freien Inseln Rotkehl-Anolis aus, die typische Baumkronenbewohner sind. Wie wir dann beobachteten, gedieh die Art allein viel besser als zusammen mit Braunen Anolis. All diese und weitere Befunde stützen unsere Vermutung, dass die Anolis-Arten sich gegenseitig beeinträchtigen. Wahrscheinlich geschieht das hauptsächlich deswegen, weil sie um dieselben Umweltressourcen konkurrieren. Vielleicht frisst auch die eine Art die andere – allerdings halten wir das nicht für so bedeutsam. Denn wir wissen aus Experimenten von Joan Roughgarden und ihren Kollegen von der Stanford University (US-Bundesstaat Kalifornien), dass Arten sich umso stärker gegenseitig abgrenzen, je ähnlicher sie sich ökologisch und äußerlich sind. Daher erscheint uns sehr plausibel, dass die Anolis-Arten sich wegen der gegenseitigen Konkurrenz auf verschiedene Umwelten spezialisierten.

Anolis-Evolution: Kein Spiel des Zufalls?

Als Evolutionsforscher kommt man sich oft vor wie ein Detektiv in einem Kriminalstück. Wir finden zwar einzelne Indizien, aber die führen selten zur Lösung. So geht es uns auch mit den karibischen Anolis-Echsen. Wir wissen noch immer nicht das Wichtigste, nämlich warum die Artenpaletten auf den einzelnen Inseln einander so verblüffend ähnlich sehen. Vielleicht erklärt sich dies aus der verhältnismäßigen Artenarmut dieser Inseln. Sie liegen so weit vom Festland, dass dort insgesamt viel weniger verschiedene Vögel, andere Echsen und überhaupt andere Tierarten, auch nur wenige Raubfeinde, vorkommen. Den Anolis boten sich darum viele freie Nischen. Die Echsen konnten sich einigermaßen ungestört und unbehelligt in verschiedene ökologische Richtungen entwickeln. Zugleich ähnelten sich die Umwelten auf den Inseln. So stand einer Evolution mit gleichem Ergebnis nichts im Wege. Für Fische gibt es dafür ein sehr gutes Beispiel: die Buntbarsche der großen ostafrikanischen Seen (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/99, S. 36).

Dass in zwei Ökosystemen zum Verwechseln ähnliche Arten leben, bildet trotzdem eine seltene Ausnahme. Nur wenn wir bei unserer Forschung weiterhin möglichst unvoreingenommen vorgehen und die Daten für sich selbst sprechen lassen, finden wir vielleicht einmal die Lösung dieses biologischen Rätsels. ■

OKAPIA

Die Braune Anolis erweist sich als recht plastisch, wenn es gilt, in bestimmten Umwelten zurechtzukommen.

GRAVITATIONS

Auf den Spuren der dunklen Materie im All

Sterne, Galaxien oder Schwarze Löcher können, ähnlich wie eine Glaslinse, das Licht noch weiter entfernter Himmelsobjekte ablenken. Dieser so genannte Gravitationslinseneffekt liefert Aufschlüsse über die dunkle Materie, die Struktur der Quasare und die großräumige Massenverteilung im Universum.

NASA / ESA

LINSEN

Von Joachim Wambsganß

In einem Spiegelkabinett wird der amüsierte Besucher mit mehreren – manchmal stark verzerrten – Bildern von sich selbst konfrontiert. Aus den Details der verzerrten und verschmelzenden Bilder könnte er im Prinzip die Form der Spiegeloberflächen ableiten. Und wenn der Betrachter nicht durch den häufigen Blick in flache Spiegel längst wüsste, wie er wirklich aussieht, könnte er aus den Zerrbildern sogar ein getreues Bild von sich selbst rekonstruieren.

Auch in unserem Universum lassen sich gelegentlich zwei, drei oder mehr – meist stark verzerrte – Bilder von weit entfernten Himmelsobjekten beobachten. Solche Mehrfachbilder kommen zustande, wenn Lichtstrahlen durch die Schwerkraftwirkung anderer Himmelskörper abgelenkt werden.

Dieser so genannte Gravitationslinseneffekt gibt Astrophysikern die Möglichkeit, über das Universum und seine kosmischen Objekte Erkenntnisse zu gewinnen, die sonst nur schwierig oder gar nicht zu erhalten wären – über die rätselhafte dunkle Materie, die großräumige Massenverteilung im Universum oder die innerste Struktur der Quasare, extrem leuchtkräftiger Kerngebiete weit entfernter Galaxien.

Astrophysik mit Gravitationslinsen ist ein noch junges Forschungsgebiet. Dennoch haben die Astronomen schon vielfältige Erscheinungsformen „verbogenen“ Lichts entdeckt. So wurde etwa die fokussierende Wirkung von einzelnen Sternen nachgewiesen, deren Masse nicht größer als die der Sonne ist. Auch Galaxien mit bis zu einer Billion Sonnen wurden als Schwerkraftlinsen identifiziert, und sogar ganze Galaxienhaufen, die Hunderte von Galaxien umfassen können. Andererseits entdeckten die Forscher an den „gelinsten“ Objekten – sowohl Sterne als auch Galaxien und Quasare – Veränderungen in der Helligkeit oder in der Form, die durch die Lichtablenkung hervorgerufen werden.

Bei einem Gravitationslinsensystem liegt zwischen dem irdischen Beobachter und einer weit entfernten ▶

Wenn ganze Galaxienhaufen – hier Abell 2218 in einer Aufnahme mit dem Hubble-Weltraumteleskop von Andrew Fruchter – als Gravitationslinsen wirken, erzeugen sie „gigantische leuchtende Bögen“. Die großen gelblichen Galaxien gehören zum Galaxienhaufen; die dünnen, zum Teil bläulichen und bogenförmig gekrümmten Galaxien stehen in weit größerer Entfernung dahinter und werden durch den Gravitationslinseneffekt mehr oder weniger stark verzerrt.

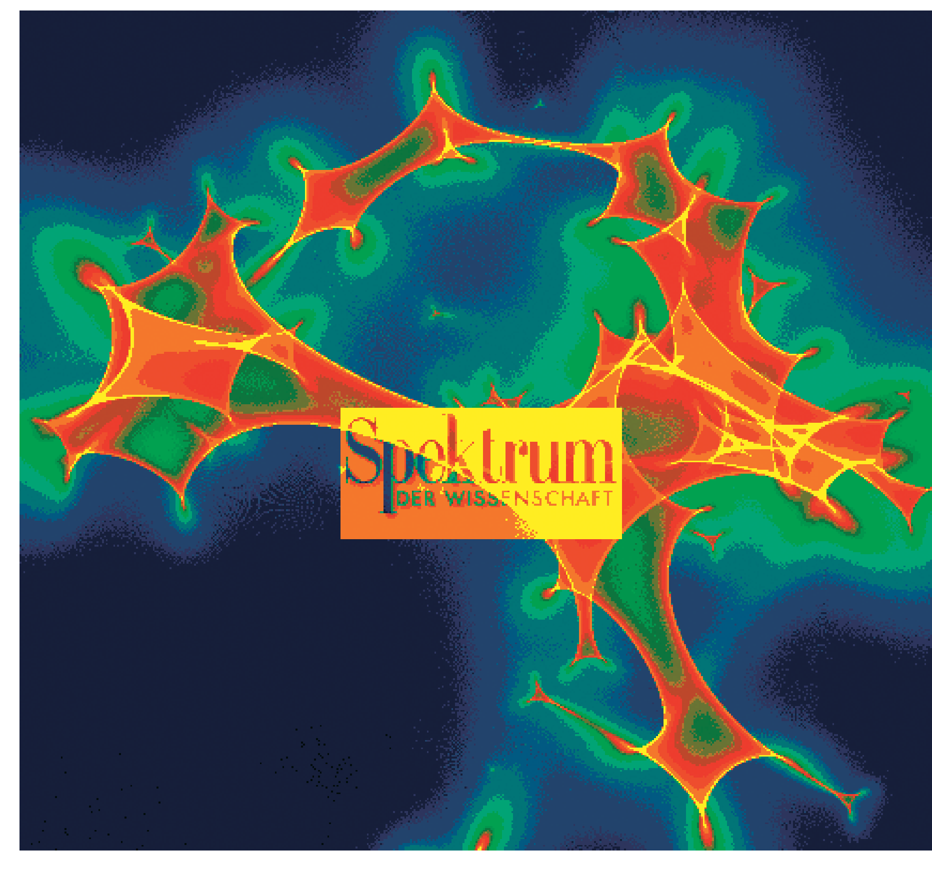
Lichtquelle ein weiteres kosmisches Objekt, das als Schwerkraftlinse wirkt, etwa ein Stern, eine Galaxie, ein Galaxienhaufen oder ein Schwarzes Loch. Solche Massenkonzentrationen lenken die Lichtstrahlen weiter entfernter Lichtquellen vom geraden Weg ab (Bild unten). Der Beobachter auf der Erde kann dadurch ein Objekt doppelt oder mehrfach sehen, obwohl es in Wirklichkeit nur einmal existiert. Bei einer solchen Konstellation sprechen Fachleute vom „starken Gravitationslinseneffekt“. Ist die fokussierende Masse nicht sehr kompakt oder steht die Quelle nicht genau hinter der Linse, führt die Lichtablenkung zu weniger dramatischen Konsequenzen, etwa nur zu leichten Verzerrungen in der Form einer fernen Galaxie – im Fachjargon „schwacher Gravitationslinseneffekt“.

Nach unserer Alltagserfahrung breitet sich Licht geradlinig aus. Wodurch kommt es im All vom geraden Wege ab? Prinzipiell folgt das Licht der kürzestmöglichen Verbindung zwischen zwei Punkten, und das ist im Normalfall eine Gerade. Doch da das Universum gewaltige Ansammlungen von Materie enthält und gemäß Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie jede Masse je nach ihrer Größe den umgebenden Raum mehr oder weniger stark krümmt, folgen auch kosmische Lichtstrahlen mitunter krummen Wegen. Die Stärke der Ablenkung hängt davon ab, wie nahe der Strahl an einem Himmelsobjekt vorbeigeht und wie viel Masse dieses hat: Der Ablenkwinkel ist direkt proportional zur Masse des ablenkenden Objekts und umgekehrt proportional zum Abstand zwischen Objekt und Lichtweg.

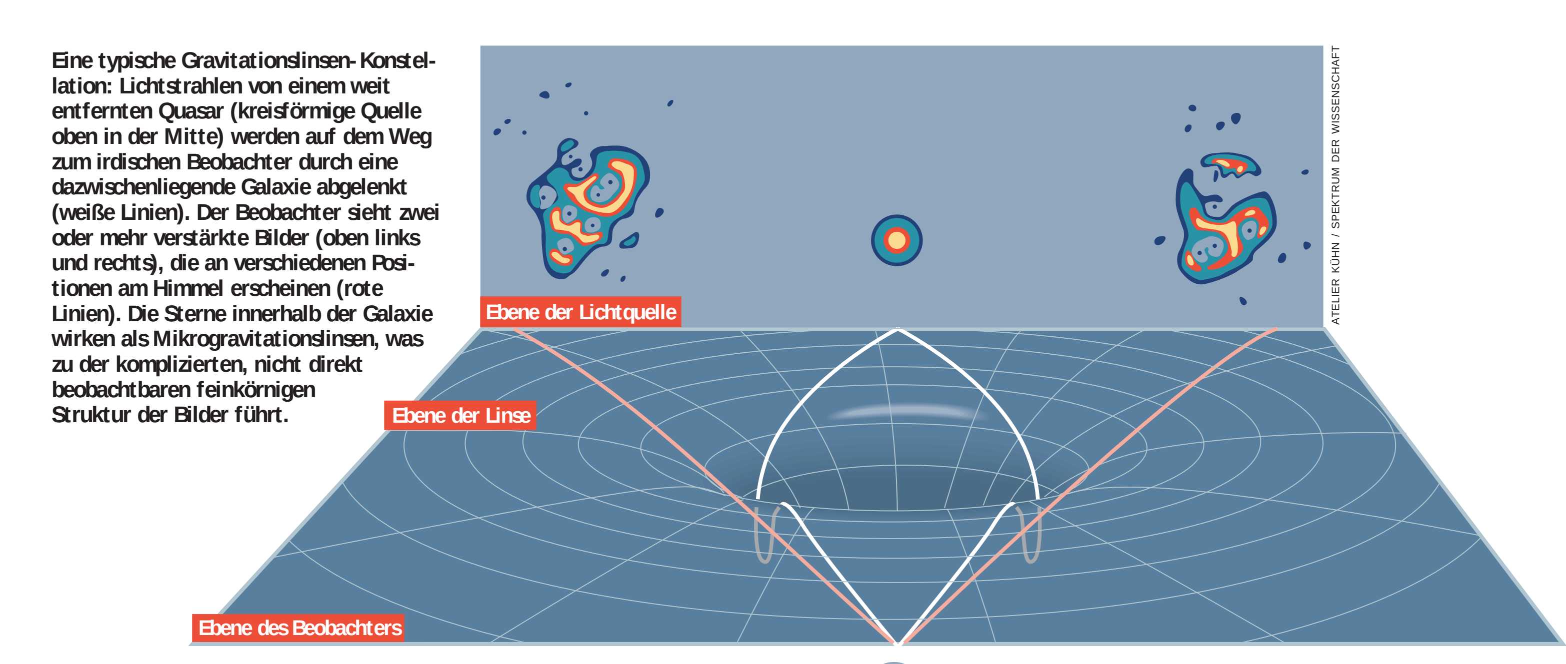
Diese kosmische Kuriosität vermag einige der faszinierendsten Probleme der modernen Astrophysik einer Lösung näher zu bringen: Größe, Alter und Geometrie des Universums, die innere Struktur von Quasaren, die Entstehung und Entwicklung von Galaxien oder die Suche nach der merkwürdigen dunklen Materie. Die Forscher hoffen sogar, mit diesem Phänomen erdähnliche Planeten um andere Sterne aufzuspüren.

Der Gravitationslinseneffekt beeinflusst die Eigenschaften der Lichtquellen:

➤ **Position:** Durch die Lichtablenkung verändert sich die scheinbare Position eines Sterns oder einer Galaxie am Himmel. Dieser Effekt ist meist nicht beobachtbar, weil wir nicht wissen, an welchem Ort das Himmelsobjekt ohne die Lichtablenkung wäre. Nur wenn sich eine bestimmte Linsenkonfiguration innerhalb kurzer Zeit – maximal während der Lebensspanne eines Astronomen – verändert und wir sozusagen den Vorher-



Das ursprüngliche Helligkeitsprofil (das „Spektrum“-Logo) wird durch ein im Computer simuliertes Ensemble von Gravitationslinsen verzerrt und mehrfach abgebildet. Die Farbflächen (oben) stellen eine Verstärkungsverteilung dar: Wenn sich die Lichtquelle in einem blauen Gebiet befindet, wird sie nur wenig verstärkt, im grünen mehr



Eine typische Gravitationslinsen-Konstellation: Lichtstrahlen von einem weit entfernten Quasar (kreisförmige Quelle oben in der Mitte) werden auf dem Weg zum irdischen Beobachter durch eine dazwischenliegende Galaxie abgelenkt (weiße Linien). Der Beobachter sieht zwei oder mehr verstärkte Bilder (oben links und rechts), die an verschiedenen Positionen am Himmel erscheinen (rote Linien). Die Sterne innerhalb der Galaxie wirken als Mikrogravitationslinsen, was zu der komplizierten, nicht direkt beobachtbaren feinkörnigen Struktur der Bilder führt.


JOACHIM WAMBSGANSS

und im roten kräftig. Liegt die Quelle auf einer der scharfen gelben Linien, führt dies zu besonders hoher Verstärkung. Quellbereiche innerhalb der gelben Linien werden mehrfach abgebildet. Die kleinen gelben Quadrate (rechts) markieren die Positionen der Gravitationslinsen.

Nachher-Effekt sehen können, ist diese Wirkung messbar.

➤ **Helligkeit:** Die Lichtablenkung und -fokussierung beeinflusst die mit einem Teleskop gemessene Helligkeit weit entfernter Sterne oder Galaxien. Die meisten kosmischen Objekte werden minimal geschwächt, einige werden verstärkt. Nur wenige Quellen erscheinen durch den Gravitationslinseneffekt sehr viel heller – sogar Verstärkungen um das Hundertfache wurden schon beobachtet. Diese sind natürlich besonders interessant.

➤ **Form:** Durch den Gravitationslinseneffekt erscheinen Galaxien in eine tangentiale Richtung auseinandergezogen und bogenförmig verzerrt. Im Extremfall können sogar ringförmige Bilder entstehen.

➤ **Anzahl:** Als dramatischste Auswirkung des starken Gravitationslinseneffekts kann es zu Doppel- oder Mehrfachbildern von weit entfernten Galaxien oder Quasaren kommen. Die zusätzlichen Bilder entstehen stets paarweise, wobei eines spiegelverkehrt ist.

Mit einer Computersimulation lassen sich all diese Auswirkungen der gravitativen Lichtablenkung besonders deutlich illustrieren (Bilder oben).

Dass Lichtstrahlen durch die Schwerkraft kosmischer Objekte abgelenkt werden, sagte Albert Einstein 1915 in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorher. Aber damit war er nicht der Erste. Bereits 1801 hatte der Berliner Astronom und Geodät Johann Georg Soldner berechnet, dass die Position eines Sterns durch die Schwerkraftwirkung der Sonne um einen winzig kleinen Winkel verschoben sein müsste. Einsteins Resultat für den Ablenkwinkel war allerdings doppelt so groß, und dieser Effekt wurde während einer Sonnenfinsternis im Jahre 1919 durch die britischen Astrophysiker Arthur Eddington und Frank Dyson gemessen. Als erste Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie war dies ein außerordentlicher Erfolg. Sogar die Tagespresse berichtete seinerzeit darüber und begründete so Einsteins immense Popularität.

In den dreißiger Jahren befasste sich Einstein erneut mit der gravitativen Lichtablenkung. Er berechnete, dass man zwei verstärkte Bilder eines Sternes sehen müsste, wenn zwischen diesem Stern und uns ein anderer als Linse wirkt; bei exakter Ausrichtung entstünde sogar ein ringförmiges Abbild. Allerdings bezweifelte Einstein, dass so etwas je tatsächlich zu beobachten sein würde. Auch andere berühmte Astrophysiker beschäftigten sich damals mit dem Linseneffekt; Fritz Zwicky war überzeugt, dass man mit Sicherheit Galaxien finden werde, die als Gravitationslinsen wirken. In den sechziger Jahren gab es nochmals eine Welle von theoretischen Arbeiten zum Thema; insbesondere konnte Sjur Refsdal – damals noch an der Universität Oslo, seit langem jedoch an der Sternwarte Hamburg-Bergedorf – zeigen, dass die Lichtablenkung dazu dienen kann, die Größe des Universums zu messen.

Erste Doppelbilder

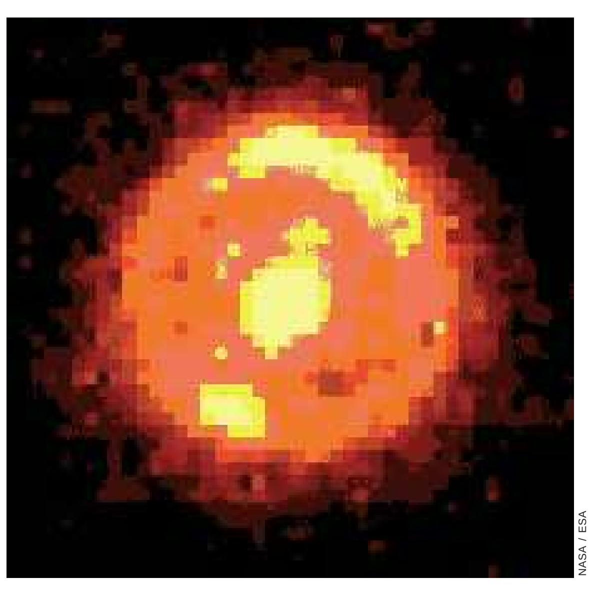
Doch erst 1979 entdeckte Dennis Walsh aus Manchester das erste Doppelbild am Himmel: Eine zwischen einem weit entfernten Quasar und uns stehende Galaxie lenkt, so fand der britische Astronom, das Licht des Quasars so stark ab, dass wir zwei Quasarbilder sehen (einen ähnlichen Doppelquasar zeigt das Bild auf Seite 48 unten). In den folgenden Jahren wurden mehr und mehr Gravitationslinsen-Phänomene aufgespürt. Die ersten „gigantischen leuchtenden Bögen“ – durch die fokussierende Wirkung eines ganzen Galaxienhaufens erzeugte, stark verzerrte Bilder von Hintergrund-Galaxien – wurden 1986 entdeckt, und zwar von Roger Lynds von den National Optical Astronomy Observatories in Tucson und Vahe Petrosian von der Stanford University sowie unabhängig von einem Team um Genevieve Soucail vom Observatoire Midi-Pyrénées in Toulouse. Und erst vor wenigen Monaten zeigten vier verschiedene Beobachterteams, dass sich die großräumigen Strukturen im Universum auch durch den schwachen Gravitationslinseneffekt bemerkbar machen.

Starke Linseneffekte werden im Kosmos relativ selten beobachtet, dafür sind sie aber bei Einzelobjekten leicht zu erkennen – als Mehrfachbilder, lange Bögen oder Ringbilder um Galaxien. Häufiger tritt der schwache Linseneffekt auf; um ihn nachweisen zu können, müssen die Forscher allerdings eine große Anzahl von Objekten untersuchen und dann die Linsenwirkung auf statistischem Wege ermitteln. Je nach der Masse der als Linse wirkenden Objekte oder nach der Art der vom Linseneffekt verzerrten Hintergrundquelle ergeben sich die unterschiedlichsten Phänomene.

Mehrfachquasare: Bis heute sind den Astronomen mehr als fünfzig Beispiele von Doppel-, Dreifach- oder Vierfachquasaren bekannt. Da die Winkelaufspaltungen zumeist nur wenige Bogensekunden betragen, sind Teleskope an den besten Standorten der Welt erforderlich, um die Bilder untersuchen zu können. Zunächst muss man Indizien dafür sammeln, dass es sich auch tatsäch- ▶

lich um Mehrfachbilder eines einzigen Quasars handelt und nicht um eine reale Gruppe solcher Himmelsobjekte. Zum einen muss die Entfernung – gemessen durch die Rotverschiebung ihres Spektrums – identisch sein. Dann müssen die Spektren selbst, die für Quasare so charakteristisch sind wie ein Fingerabdruck für einen Menschen, miteinander übereinstimmen. Starken Auftrieb erhält die Linsenhypothese, wenn sich zwischen den Quasarbildchen eine als Linse wirkende Galaxie ausfindig machen lässt, deren Entfernung deutlich geringer ist als die der Quasare. Der ultimative Beweis ist erbracht, wenn die Helligkeitsveränderungen, die ein Quasar mit der Zeit ausführt, in allen Bildern parallel verlaufen, eventuell mit einer gewissen Zeitverzögerung. Solche Mehrfachquasare sind allerdings sehr selten – nur etwa einer von 500 Quasaren ist durch eine Gravitationslinse doppelt zu sehen – und entsprechend schwer zu finden. Die Linse ist in den meisten Fällen eine Galaxie (Bilder unten).

Gigantische leuchtende Bögen, Arcs und Arclets: Wenn ganze Galaxienhaufen mit ihrer kombinierten Masse fokussierend wirken, kann der Ablenkwinkel zehnmal größer sein als bei Galaxien-Linsen, und der Effekt erfasst oft viele Hintergrundgalaxien auf einmal. Dabei entstehen stark verzerrte Bögen, so genannte Arcs, und noch viel mehr leicht verzerrte „Arclets“ (Bild Seite 51 oben). Fast hundert Galaxienhaufen sind inzwischen als „linsend“ registriert. Mit Hilfe der in einer tangentialen Richtung verzerrten Hintergrundgalaxien kann man die Masse des Galaxienhaufens messen und seine genaue Massenverteilung rekonstruieren. Dabei stellt sich eindeutig heraus, dass in Galaxienhaufen eine noch unbekannte Art von nichtleuchtender, dunkler Materie vorherrscht.



NASA / ESA

Dieses ringförmige Bild der Hintergrund-Galaxie B1938+666 entsteht, weil die Linsen-Galaxie (im Zentrum) und die Quell-Galaxie (stark verzerrt als Ring) perfekt hintereinander stehen. Die Aufnahme haben Lindsay King – heute an der Universität Bonn – und ihre Kollegen mit dem Hubble-Weltraumteleskop im infraroten Licht gemacht.

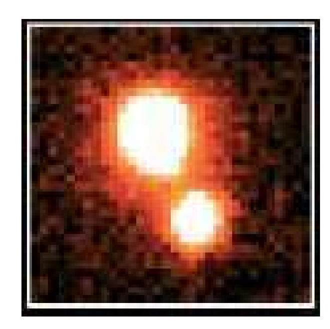
Einstein-Ringe: Wenn eine Galaxie mit nahezu kugelsymmetrischer Massenverteilung direkt vor einer weiter entfernten Galaxie liegt, können wir ein ringförmiges Bild der Hintergrundgalaxie sehen – einen so genannten Einstein-Ring (Bild oben). Sind die Entfernungen beider Galaxien bekannt, lässt sich aus dem Durchmesser des Ringbildes sehr genau die Masse der Vordergrundgalaxie bestimmen. Normalerweise ist die Gesamtmasse von Galaxien nur schwer abzuschätzen: Man muss aus dem von den Sternen und dem Gas einer Galaxie ausgestrahlten Licht auf die Masse schließen. Darum ist der Gravitationslinseneffekt eine elegante und wichtige Methode zur Massenbestimmung geworden.

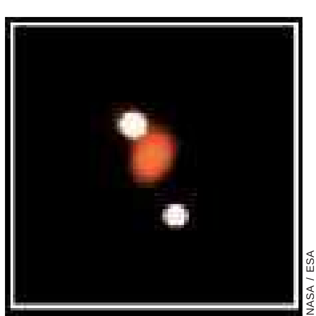
Mikrolinseneffekt bei Quasaren: Die Linsenwirkung ist nicht immer so offensichtlich wie bei den bisherigen Beispielen. Wenn etwa ein Stern Doppelbilder erzeugt, dann liegen sie so nahe beisammen, dass selbst die besten Teleskope der Welt sie nicht aufzulösen vermögen. Aber selbst dann ist der Effekt noch durch die zeitlich veränderliche Verstärkungswirkung eines Sternenfelds messbar, hinter dem ein Quasar sich bewegt: Wir sehen ihn zu verschiedenen Zeiten verschieden hell (siehe Bild auf der gegenüberliegenden Seite). Der Grad der Verstärkung hängt auch von der unbekannten Größe des Quasars ab: Ein relativ großer Quasar wird nur wenig verstärkt, seine Helligkeit ändert sich nur allmählich; ein kleiner Quasar ist hingegen starken Helligkeitsvariationen unterworfen.

Mikrolinseneffekt bei Sternen: Wie wir aus vielerlei astronomischen Messungen wissen, enthalten die Milchstraße und andere Galaxien in ihren äußeren Bereichen sehr viel nichtleuchtende Materie. Die Natur dieser dunklen Materie zählt zu den großen Rätseln der heutigen Astrophysik. Denn aus theoretischen Gründen muss diese mysteriöse Substanz völlig andere Eigenschaften haben als die normale, aus den bekannten Elementarteilchen aufgebaute Materie.

Im Jahre 1986 machte Bohdan Paczyński von der Princeton University folgenden Vorschlag: Mit Hilfe des Mikrolinseneffekts solle man nachprüfen, ob die dunkle Materie in den äußeren Bereichen unserer Milchstraße in Form von kompakten Objekten vorliegt, den so genannten Machos (MAssive Compact Halo Objects). Wenn ein Macho von uns aus gesehen vor einem Stern einer Nachbargalaxie – der Großen Magellanschen Wolke – vorbeizieht, dann würde uns dieser Stern zunächst in charakteristischer Weise verstärkt erscheinen, bis seine Helligkeit nach dem Vorübergang wieder auf den Normalwert abfällt.

Mehrere internationale Forscherteams – unter anderem eine amerikanisch-australische Gruppe („Macho“), eine französische („Eros“) sowie eine polnisch-amerikanische („Ogle“) – begaben sich Anfang der neunziger Jahre mit dieser Methode auf die Suche nach Machos. Im Laufe von sieben Jahren wurden fast zwei Dutzend solcher Mikrolinsenereignisse an Sternen der Großen Magellanschen Wolke gefunden. Die Lichtkurven könnten durch Objekte von etwa der halben Sonnenmasse erzeugt worden sein. Die Gesamtanzahl ist aber so gering, dass sie nur einen Bruchteil der dunklen Materie in unserer Milchstraße zu erklären vermag.





NASA / ESA

Der ursprünglich von Lutz Wisotzki (heute Universität Potsdam) entdeckte Doppelquasar HE1104-1805, aufgenommen mit dem „New Technology Telescope“ der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile (oben): Durch Bildverarbeitungstechniken, die von Frederic Courbin – damals Universität Lüttich – und Mitarbeitern entwickelt wurden, wird die zwischen den beiden Quasarbildern liegende sehr schwache Galaxie sichtbar, die als Gravitationslinse wirkt (unten).

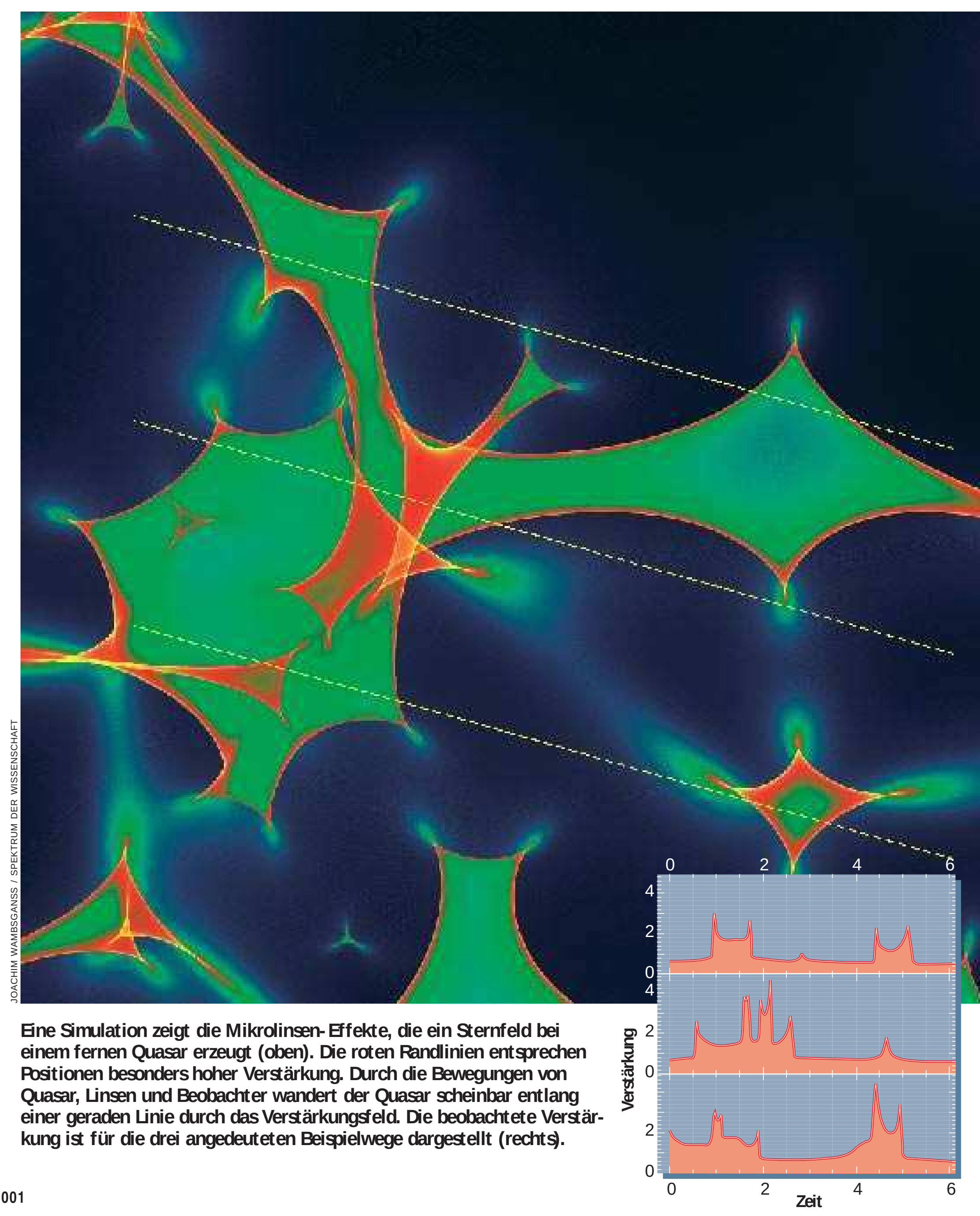
Dieselben Beobachterteams suchen derzeit noch in einer anderen Richtung nach solchen Mikrolinsenereignissen, nämlich zum Zentrum unserer Milchstraße hin. Dort wurden inzwischen über 500 derartige Lichtkurven gefunden – weit mehr als ursprünglich erwartet. Aber in diesem Fall verbergen sich hinter den Gravitationslinsen nicht Machos, sondern ganz normale Sterne niedriger Masse, die sich in der Scheibe der Milchstraße aufhalten. Die Tatsache, dass diese häufiger auftreten als erwartet, zeigt, wie unvollständig unsere Kenntnis des eigenen Milchstraßen-„Hinterhofs" war – und wie der Linseneffekt uns hilft, Neues über die Struktur der Milchstraße zu erfahren.

Trotz des notwendigen großen Beobachtungsaufwands sucht man intensiv nach dem kollektiven Ablenkeffekt, den Materiehäufungen im Rahmen der großräumigen Struktur des Universums auf dahinter liegende Galaxien ausüben. Da die ablenkende Materie in diesem Fall weit verteilt ist, erwartet man keine spektakulären Mehrfachabbildungen. Wegen der großen Vielfalt der Galaxienformen und ihrer nur geringfügigen Verzerrung durch die Lichtablenkung lässt sich der Effekt nicht – wie etwa bei den gigantischen Bögen – für eine einzelne Galaxie nachweisen. Der einzig mögliche Weg ist, die Form vieler Tausender sehr weit entfernter Galaxien zu analysieren und nach einer systematischen Deformierung zu suchen: Alle Galaxien sollten ein klein wenig in die gleiche Richtung verzerrt sein.

Da die zu erwartenden Effekte so klein sind, erfordern diese Projekte Teleskope mit sehr großen Abbildungsfeldern, viele Nächte mit optimalen Beobachtungsbedingungen und ein Höchstmaß an Analysekunst. Dennoch konnten vor wenigen Monaten gleich vier internationale Wissenschaftler-Teams – unter David J. Bacon von der Cambridge University, Nick Kaiser vom Institute of Astronomy in Hawaii, Ludewik van Waerbecke vom Canadian Institute for Theoretical Astrophysics in Toronto und David M. Wittman von Lucent Technologies in Murray Hill – den Nachweis dieses sehr schwachen Gravitationslinseneffekts bekannt geben. Die Technik verspricht in naher Zukunft Aufschlüsse darüber, welches kosmologische Modell unsere Welt am besten beschreibt.

Eine Grundfrage der Kosmologie ist die nach Größe und Alter des Universums. Wie wir wissen, dehnt sich das Weltall insgesamt aus: Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto größer ihre so genannte Fluchtgeschwindigkeit. Der Zusammenhang zwischen Entfernung und Geschwindigkeit – der Proportionalitätsfaktor heißt nach dem Entdecker der Fluchtbewegung „Hubble-Konstante" – ist allerdings nur relativ ungenau bekannt.

Der Kehrwert der Hubble-Konstante gibt in etwa das Weltalter an, und multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich aus diesem Weltalter eine Länge. Sie gibt ungefähr die heutige Größe des Universums an. Das Problem ist leider, dass man zwar die Geschwindigkeit ▶



Eine Simulation zeigt die Mikrolinsen-Effekte, die ein Sternfeld bei einem fernen Quasar erzeugt (oben). Die roten Randlinien entsprechen Positionen besonders hoher Verstärkung. Durch die Bewegungen von Quasar, Linsen und Beobachter wandert der Quasar scheinbar entlang einer geraden Linie durch das Verstärkungsfeld. Die beobachtete Verstärkung ist für die drei angedeuteten Beispielwege dargestellt (rechts).

einer Galaxie oder eines Quasars anhand der Rotverschiebung sehr genau messen kann, die Entfernung aber nicht.

Wie der Astrophysiker Sjur Refsdal schon 1964, lange bevor die erste Gravitationslinse entdeckt wurde, gezeigt hat, bietet der Linseneffekt eine elegante Möglichkeit, diese kosmische Entfernungsskala zu bestimmen und unseren Rotverschiebungsmaßstab zu eichen: Man nehme ein System aus zwei „gravitationsgelinsten“ Bildern eines sehr weit entfernten Quasars und messe die Zeitverzögerung zwischen beiden Bildern.

Die Idee funktioniert folgendermaßen: Erzeugt eine Galaxie ein Doppelbild eines dahinter liegenden Quasars, gehen die beiden Lichtbündel beispielsweise links und rechts an der Gravitationslinse vorbei. Die beiden Lichtwege sind im Allgemeinen unterschiedlich lang. Durch diese Wegdifferenz erreicht ein Quasar-Signal in den beiden Bildern die Erde zu verschiedenen Zeiten. Zu dieser geometrischen Zeitverzögerung kommt noch die gravitative auf Grund der Allgemeinen Relativitätstheorie: Weil das eine Lichtbündel näher am Zentrum der Linse vorbeigeht und darum stärkeren Gravitationsfeldern ausgesetzt ist, wird dort das Licht stärker gebremst als auf dem anderen, weiter außen vorbeiführenden Weg. Interessanterweise sind beide Verzögerungen – die geometrische und die gravitative – von der gleichen Größenordnung.

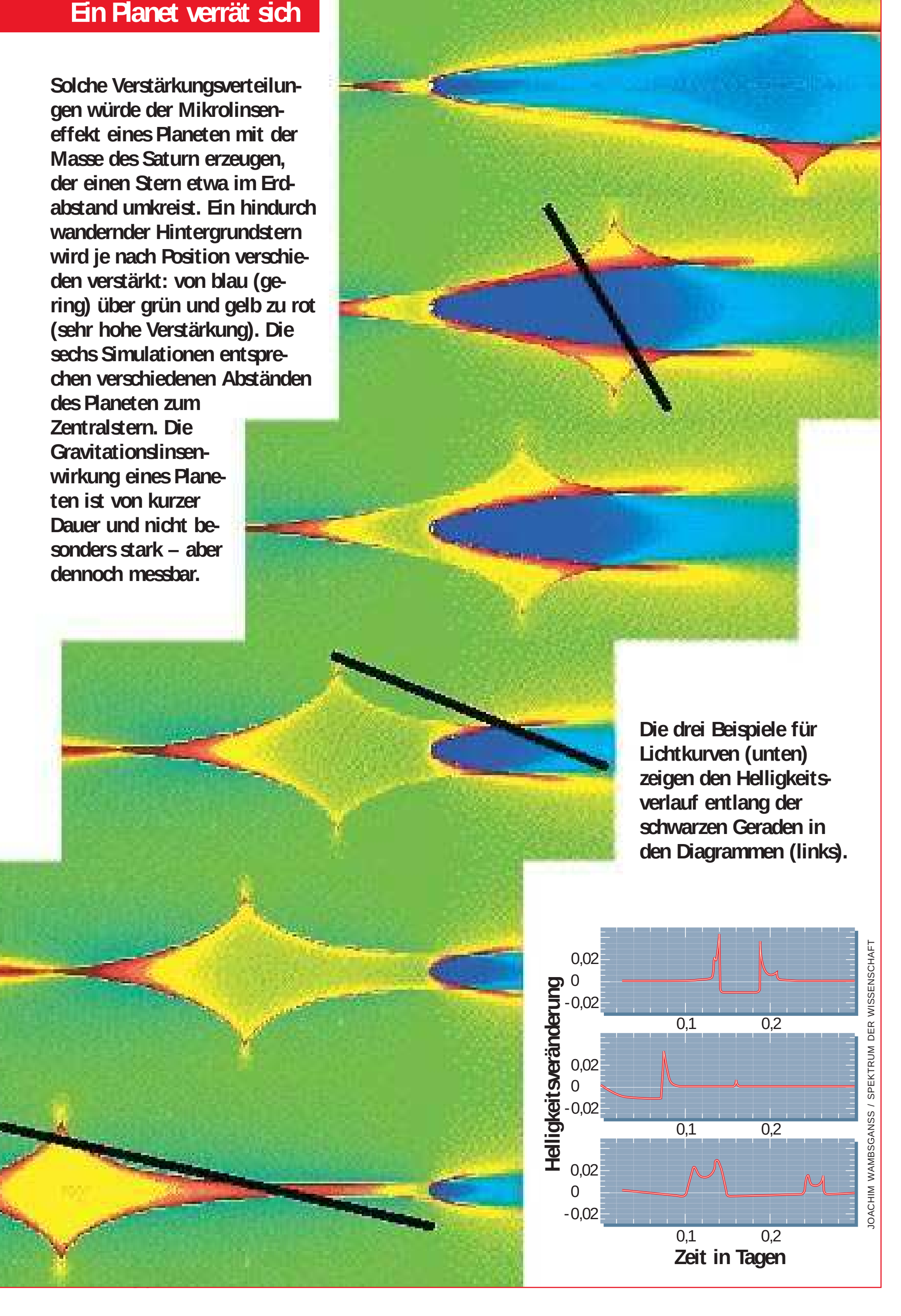
Wie lässt sich nun aus der Zeitverzögerung auf die absolute Entfernung zum Quasar schließen? In einer statischen Beobachtungssituation kann man nur dimensionslose Größen messen: die Winkelabstände und Helligkeitsverhältnisse zwischen den Bildern sowie die relative Helligkeitsverteilung der Linsengalaxie. Daraus lässt sich eine Massenverteilung für das Linsensystem konstruieren, die alle Beobachtungsgrößen reproduziert. Ein solches Modell für die Gravitationslinse gibt auch an, welchen relativen Anteil die Laufzeitdifferenz an der gesamten Lichtlaufzeit hat.

Zeitlich versetzte Lichtkurven

Das Modell ist aber nicht eindeutig: Verdoppelt man die absolute Entfernungsskala, Größe und Masse der Linsengalaxie beispielsweise, dann erhält der Beobachter auf der Erde dasselbe Erscheinungsbild. Somit vermag eine fotografische Aufnahme des Gravitationslinsensystems zwischen diesen beiden Modellen nicht zu unterscheiden. Allerdings ändert sich im zweiten Fall der absolute Wert der Lichtlaufzeitdifferenz: Er wird doppelt so groß. Das heißt: Wenn es gelingt, die Laufzeitdifferenz zu messen, lässt sich daraus die Lichtlaufzeit absolut bestimmen.

Beim Doppelquasar sagt das Modell voraus, dass die Differenz etwa ein Zehnmilliardstel der gesamten Laufzeit ausmacht. Man muss also die gemessene Ankunftszeitdifferenz nur mit zehn Milliarden – und mit der Lichtgeschwindigkeit – multiplizieren und erhält so die Entfernung zum Quasar. Sind die Rotverschiebungen und damit die Fluchtgeschwindigkeiten von Linse und Quasar bekannt, errechnet sich daraus die Hubble-Konstante.

Die Lichtlaufzeitdifferenz ist allerdings nur messbar, wenn der ferne Quasar seine Leuchtkraft mit der Zeit verändert. Dann kann man durch wiederholtes Messen der Helligkeit beider Quasarbilder ihre Lichtkurven bestimmen und daraus die relative Verschiebung des Signals ermitteln. In der Praxis ist das aus vielerlei Gründen nicht einfach. Deshalb



Ein Planet verrät sich

Solche Verstärkungsverteilungen würde der Mikrolinseneffekt eines Planeten mit der Masse des Saturn erzeugen, der einen Stern etwa im Erdabstand umkreist. Ein hindurch wandernder Hintergrundstern wird je nach Position verschieden verstärkt: von blau (gering) über grün und gelb zu rot (sehr hohe Verstärkung). Die sechs Simulationen entsprechen verschiedenen Abständen des Planeten zum Zentralstern. Die Gravitationslinsenwirkung eines Planeten ist von kurzer Dauer und nicht besonders stark – aber dennoch messbar.

Die drei Beispiele für Lichtkurven (unten) zeigen den Helligkeitsverlauf entlang der schwarzen Geraden in den Diagrammen (links).

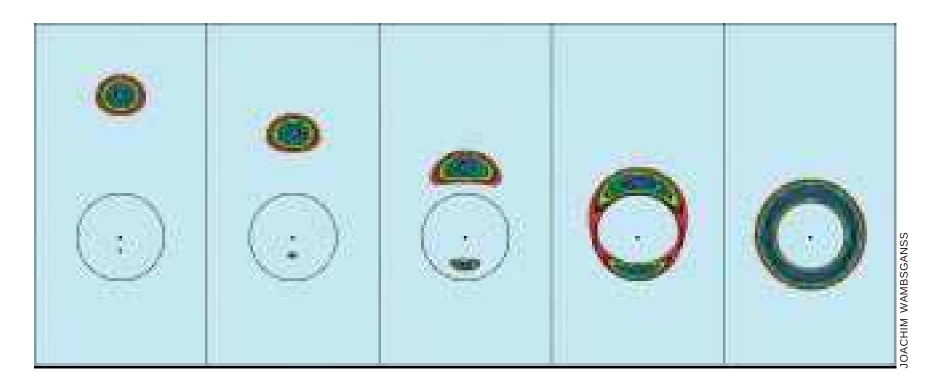
Hier wirkt der gelbe Galaxienhaufen – nach seinen Himmelskoordinaten 0024+1654 genannt – als Gravitationslinse: Die zahlreichen blauen Bögen rundum sind stark verzerrte Bilder ein und derselben Galaxie weit dahinter.

NASA; W. N. COLLEY UND E. TURNER, PRINCETON UNIVERSITY; J. A. TYSON, BELL LABORATORIES, LUCENT TECHNOLOGIES

hat es auch fast zwanzig Jahre gedauert, bis die erste Zeitverzögerung zweifelsfrei bestätigt wurde (Kasten auf Seite 52). Der daraus abgeleitete Wert für die Hubble-Konstante ist zwar noch immer etwas ungenau. Inzwischen wurden aber Zeitverzögerungen bei mehreren Gravitationslinsensystemen gemessen. Die Tendenz der Ergebnisse deutet auf eine relativ niedrige Hubble-Konstante von etwa 65 Kilometern pro Sekunde und Megaparsec hin. Dies entspricht einem hohen Alter des Universums. Wahrscheinlich wird mit der Refsdalschen Gravitationslinsenmethode der Wert der Hubble-Konstante bald mindestens so genau bestimmt sein wie mit anderen Verfahren.

Vermutlich macht die dunkle Materie den größten Teil der Masse im Universum aus. Doch da sie kein Licht ausstrahlt, wissen wir kaum etwas über ihre Natur und ihre Verteilung. Denn astrophysikalische Messungen beruhen fast ausschließlich auf elektromagnetischer Strahlung, die wir von kosmischen Objekten empfangen. Die dunkle Materie dagegen verrät ihre Existenz allein durch ihre Schwerkraft – und genau deswegen lenkt sie auch Lichtstrahlen ab.

Somit ist der Gravitationslinseneffekt einer der wenigen Zugänge zu dem Rätsel, das die dunkle Materie umgibt. Bei Galaxienhaufen konnten die Astrophysiker aus der Lichtablenkung – sowie durch Analyse der Galaxien-Geschwindigkeiten oder der emittierten Röntgenstrahlung – die Gesamtmenge der Materie abschätzen. Dieser Wert übertrifft jedoch stets ▶



JOACHIM WAMBSGANSS

Ein „linsendes" stellares Objekt (kleiner Punkt im Zentrum des Kreises) und ein Stern im Hintergrund kommen einander durch ihre Relativbewegung immer näher. Zunächst (ganz links) erscheint das fast ungestörte Hauptbild sowie ein sehr schwaches Nebenbildchen knapp jenseits der Linse. Mit schrumpfendem Winkelabstand zwischen Linse und Quelle wird das zweite Bild größer und heller; das erste wird deutlicher verzerrt. Ganz rechts ist ein Einstein-Ring entstanden, weil Linse und Quelle exakt hintereinander stehen.

deutlich die Gesamtmasse der Licht aussendenden Sterne – ein klares Indiz dafür, dass die Differenz in nichtleuchtender Materie stecken muss. Seit es gelang, aus der leichten Verformung der Hintergrundgalaxien die Verteilung der vorwiegend dunklen Materie in den Galaxienhaufen zu bestimmen, weiß man, dass sie sich in der Nähe der leuchtenden Materie aufhält. Allerdings ist man damit dem Wesen der dunklen Materie noch nicht sehr viel näher gekommen.

Gäbe es völlig dunkle Galaxien – etwa große Gasansammlungen, bei denen aus irgendwelchen Gründen die Sternentstehung verhindert wäre – oder isolierte Schwarze Löcher mit galaxienähnlichen Massen, dann sollten auch sie ab und zu Mehrfachquasare erzeugen. Doch da man in allen bekannten Fällen stets zwischen den Quasar-Bildern eine normale Galaxie als Linse identifizieren konnte, lässt sich ausschließen, dass solche dunklen Galaxien oder isolierte supermassive Schwarze Löcher in großer Anzahl existieren.

Bestünde die dunkle Materie in den äußeren Bereichen unserer Milchstraße aus den bereits erwähnten Machos, so müssten sie ihre Existenz durch gelegentliche Mikrolinsenereignisse verraten. Ihre Seltenheit deutet jedoch darauf hin, dass Machos höchstens einen Teil der dunklen Materie in der Milchstraße erklären können. Durch die Analyse der Lichtkurven von Mehrfachquasaren lassen sich im Prinzip solche Machos auch in anderen Galaxien nachweisen. Aber auch dort sprechen die bisherigen spärlichen Ergebnisse eher dagegen, dass die dunkle Materie in dieser Form vorliegt. Zwar ist es bisher auch mit dem Gravitationslinseneffekt noch nicht gelungen, der dunklen Materie ihr Geheimnis zu entreißen – aber man ist ihr auf der Spur.

Nachweis erdähnlicher Planeten

Wie erwähnt wurden bisher in Richtung Milchstraßenzentrum rund 500 Mikrolinsen entdeckt, wobei die Linsen vermutlich gewöhnliche Sterne sind. Wird nun ein solcher Stern von einem Planeten umkreist, kann es gelegentlich vorkommen, dass das kurzfristig verstärkte Licht des Hintergrundsterns geringfügig verändert wird (Kasten auf Seite 50). Obgleich die von dem Planeten erzeugten Helligkeitsänderungen meist nur wenige Prozent betragen, sind solche Variationen messbar. Mehrere Beobachtergruppen – das PLANET-Team unter Penny Sackett aus Groningen, MPS geleitet von David Bennett aus Notre Dame oder MOA unter Phil Yock aus Auckland – setzten bei der Suche nach Planeten um andere Sterne auf diese Methode. Bisherige Erfolgsmeldungen konnten zwar noch nicht zweifelsfrei bestätigt werden. Aber es ist nur eine Frage der Zeit, bis der erste wirklich überzeugende Planetenkandidat mit der Gravitationslinsenmethode gefunden wird.

Dies ist bisher auch die einzige Methode, die mit irdischen Teleskopen Planeten mit Erdmasse entdecken kann. Alle anderen Suchmethoden sind noch nicht empfindlich genug. Denn die Wirkung eines Planeten auf Position oder Geschwindigkeit des Zentralsterns – diesen Effekt nutzen die meisten Methoden – schwindet mit kleiner werdender Planetenmasse. Bei der Mikrolinsenmethode kann auch ein Planet kleiner Masse eine deutliche Verstärkung des Hintergrundsterns herbeiführen.

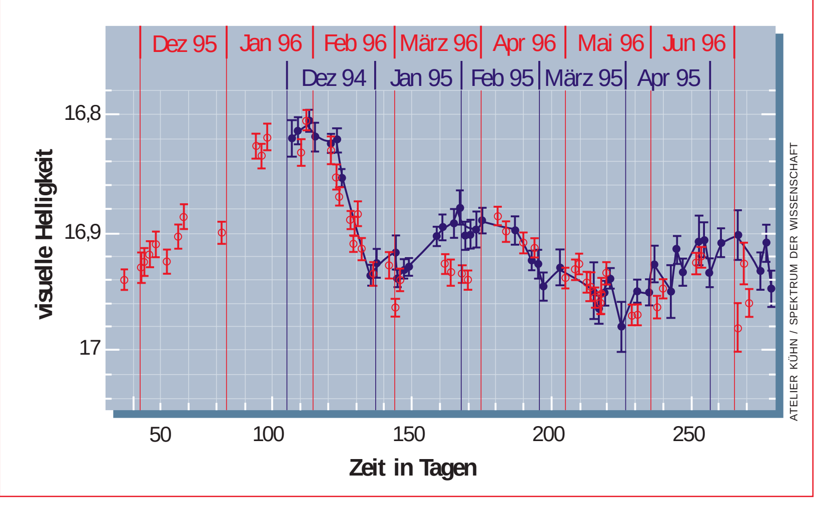
Schließlich kann der Linseneffekt auch zur Lösung der Frage beitragen, ob es eine „kosmologische Konstante" gibt und wie groß sie ist. In den zwanziger Jahren baute Einstein diese mathematische Größe zunächst in seine Formeln ein, um ein statisches Universum zu ermöglichen. Später – nachdem der Astronom Edwin Hubble die Expansion des Weltalls entdeckt hatte – revidierte Einstein dies. Doch in jüngster Zeit gibt es wieder Erkenntnisse, die für eine kosmologische Konstante sprechen (siehe „Der explosive neue Kosmos", Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 30).

Die kosmologische Konstante bewirkt eine beschleunigte Ausdehnung des Weltalls; möglicherweise verhindert sie dadurch auch für alle Zeiten eine Abbremsung der Expansion und einen anschließenden Kollaps des Universums. Ihre genaue Wirkung hängt von ihrer heutigen Größe und dem Wert der Materiedichte des Weltalls ab.

Hier kommt der Gravitationslinseneffekt ins Spiel. Da die Geometrie und die Expansionsgeschwindigkeit des Universums vom genauen Wert der kosmologischen Konstante abhängen, beeinflusst sie die Häufigkeit von – durch Gravitationslinsen vorgespiegelten – Mehrfachquasaren und die Entfernungsverteilung von Galaxien-Linsen. Die neuesten Ergebnisse von Emilio Falco, Chris Kochanek und Jose Munoz vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) liefern über den Gravitationslinseneffekt eine obere Grenze für die kosmologische Konstante. Ihre Schlussfolgerung: Wäre die Konstante größer, müssten wir deutlich mehr Mehrfachquasare finden. Dieser Grenzwert für die kosmologische Konstante ist im Augenblick gerade noch verträglich mit anderen Messungen zur Geometrie des Universums, die auf der Helligkeitsverteilung von Supernovae beruhen.

Zeitlich versetzte Lichtkurven eines Doppelquasars

Der Helligkeitsverlauf der beiden Bilder des Doppelquasars Q0957+561 (rote und blaue Daten) ist zeitlich um 417±3 Tage versetzt. Aus dieser Lichtlaufzeitdifferenz – und einem geometrischen Modell für die Linse, aus dem das Verhältnis von Laufzeitdifferenz zu Gesamtlaufzeit des Lichts hervorgeht – lässt sich die Hubble-Konstante berechnen, die ein Maß für Größe und Alter des Universums ist. Die Daten haben Tomislav Kundić – jetzt bei Renaissance Technologies – und Mitarbeiter an der Universität Princeton zusammengestellt.



Die tatsächlich beobachtete Seltenheit von Gravitationslinsen favorisiert demnach kleinere Werte der kosmologischen Konstante – und könnte sogar ganz ohne sie erklärt werden –, während die Supernova-Methode eher auf einen größeren Wert hinweist. Zur Zeit finden mehrere Himmelsdurchmusterungen statt, die ganz ohne Zweifel auf weitere Mehrfachquasare stoßen werden. Diese neuen Untersuchungen werden wesentlich bessere Häufigkeitsanalysen von Quasaren in Gravitationslinsensystemen ermöglichen, sodass die spannende Frage nach der Größe der kosmologischen Konstante hoffentlich bald eine genauere Antwort finden wird.

In nicht mehr als zwanzig Jahren hat sich der Gravitationslinseneffekt als wichtige Forschungsmethode in der Astrophysik etabliert. Besonders interessante Ergebnisse hat er in der Kosmologie erbracht – ob bei der Bestimmung der Hubble-Konstante, der Frage der kosmologischen Konstante, der Suche nach der dunklen Materie, bei der Messung der Masse und Massenverteilung von Galaxienhaufen oder der großräumigen Struktur des Universums. Auch für unser Verständnis der Quasare hilft uns die Lichtablenkung weiter: Sowohl Größe als auch Helligkeitsprofil ihrer innersten Regionen sind durch den Mikrolinseneffekt zugänglich. Und selbst zum Thema Galaxienentstehung und -entwicklung oder Struktur der Milchstraße haben in letzter Zeit Gravitationslinsen neue Erkenntnisse gebracht. Mit dem Linseneffekt können wir die Ablenkwirkung über einen Massenbereich von mehr als zwanzig Zehnerpotenzen hinweg messen – von Planeten bis zur großräumigen Struktur des Universums.

Die Wirkungen des Effekts können Astronomen mit unterschiedlichen Techniken untersuchen: mit direkten Abbildungen, Spektren oder Zeitserien. Teleskope ganz verschiedener Größe werden zu seiner Erforschung genutzt. Von sehr langwelligen Radioemissionen über Infrarot, sichtbares und ultraviolettes Licht bis zu hochfrequenten Röntgenstrahlen wurden gravitative Ablenkungen über das gesamte Spektrum nachgewiesen – das sind mehr als 15 Größenordnungen auf der Wellenlängenskala. Die Zukunft des Gravitationslinseneffekts hat gerade erst begonnen.

NASA / ESA

Der Vierfachquasar Q2237+0305 liegt in dieser Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops um das Zentrum einer relativ nahe gelegenen Galaxie. Aus den Lichtkurven der vier Bilder von Q2237+0305 im Verlauf der vergangenen drei Jahre – aufgenommen von Przemek Wozniak (Universität Princeton) und Kollegen von der Universität Warschau – kann man auf die Masse der Mikrolinsen sowie auf die Größe und das Helligkeitsprofil des Quasars schließen (rechts).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Literaturhinweise

Nützliche Illusionen – Astrophysik mit Gravitationslinsen. Von Joachim Wambsganß. Physik in unserer Zeit 3/2000, S. 100.

Gravitationslinsen. Von Edwin L. Turner. Spektrum der Wissenschaft 9/1988, S. 104.

Gravitational Lenses. Von Peter Schneider, Jürgen Ehlers und Emilio E. Falco. Springer, 1992.

Weblinks zum Thema finden Sie unter ***www.spektrum.de***

Joachim Wambsganß *ist Professor für Astroteilchenphysik an der Universität Potsdam. Sein Forschungsschwerpunkt ist der Gravitationslinseneffekt sowie dessen verschiedene Anwendungen. Daneben beschäftigt er sich mit der Erforschung von Galaxienhaufen und der Suche nach extrasolaren Planeten.*



ZELLBIOLOGIE

Reißwolf für Proteine

Wie entsorgen Zellen überflüssige Proteine? Sie leiten sie in Gebilde aus vielen Verdauungsenzymen – so genannte Proteasomen –, welche die Proteine zerlegen. Das Material wird so wieder verwertbar. Die medizinische und pharmazeutische Forschung nutzt diesen Abbauvorgang als eine Fundgrube, etwa im Kampf gegen Krebs oder Aids.

Von Alfred L. Goldberg, Stephen J. Elledge und J. Wade Harper

Zellen müssen unentwegt flexibel sein. Immerfort haben sie sich neuen Situationen anzupassen. Dazu gehört nicht nur, dass sie die jeweils gerade benötigten Proteine herstellen; sondern sie sollten auch die überflüssigen unverzüglich entsorgen, ebenso die fehlerhaften. Als Putzkolonne dient eine Schar von Gebilden, die tatsächlich fast wie Mülltonnen aussehen. In ihnen werden die Proteine von Verdauungsenzymen abgebaut. Diese „Proteasomen" ziehen ausgediente Proteine – gestreckt wie auf der Folterbank – in sich hinein und spucken sie zerstückelt wieder aus. So kann die Zelle das Material neu verwerten.

Die Molekularbiologen kennen die Recyclingtonnen noch nicht lange. Je mehr sie nun über ihre Bedeutung im Stoffwechsel der Zellen herausfinden, umso mehr klären sich auch viele andere Zusammenhänge, vom normalen Zellwachstum bis hin zu vielen Krankheiten. Darunter sind Erbleiden wie die Mukoviszidose und verschiedene Krebsformen. Die Proteasomen sind für viele Zellfunktionen außerordentlich wichtig und entsprechend zahlreich. Ungefähr 30 000 solche Müllschlucker mit Reißwolf besitzt jede unserer Zellen. Falls diese ausgeklügelte Maschinerie nicht ordnungsgemäß arbeitet, werden wir krank. Aber auch manche Viren nutzen die Proteasomen für ihre eigenen Zwecke, zum Beispiel das menschliche Immunschwäche-Virus HIV.

Voraussichtlich wird die nächste Generation von Medikamenten gegen Krebs und andere schwere Krankheiten auch Wirkstoffe aufweisen, die entweder das Verhalten der Proteasomen selbst manipulieren oder die an dem Prozess angreifen, der Proteine den Abbau-Fabriken zuführt. Mehrere pharmazeutische Unternehmen untersuchen bereits solche Hemmsubstanzen. Zwei von ihnen werden schon am Menschen auf ihre Tauglichkeit als Arzneimittel geprüft.

Entdeckung des Proteasoms

Proteine nehmen in der Zelle vielerlei Aufgaben wahr. Manche bilden Zellstrukturen, andere sorgen etwa für den Transport von Molekülen. Viele fungieren als Enzyme, die lebenswichtige chemische Reaktionen katalysieren. Die meisten Proteine werden alle paar Tage erneuert, auch in Zellen, die sich kaum teilen. Manche Proteine halten sich durchschnittlich nur etwa zwanzig Minuten, andere in derselben Zelle bis zu Wochen. Die Abbaugeschwindigkeit ändert sich aber manchmal sehr schnell, wenn sich der Körper aus irgendwelchen Gründen umstellen muss.

Von der Genaktivität hängt es ab, welche Proteine eine Zelle gerade herstellt. Doch die Aminosäureketten müssen sich noch falten und zusammenknäueln, um die nötige Stabilität zu erlangen und funktionsfähig zu werden. Nun faltet sich nicht jedes Protein richtig und sollte darum schleunigst wieder verschwinden. Lange glaubten Forscher, dass fehlerhafte und ausgediente Proteine hauptsächlich in kleinen Membransäckchen, den „Lysosomen", beseitigt werden. Diese Strukturen kommen in fast jeder Zelle ▶

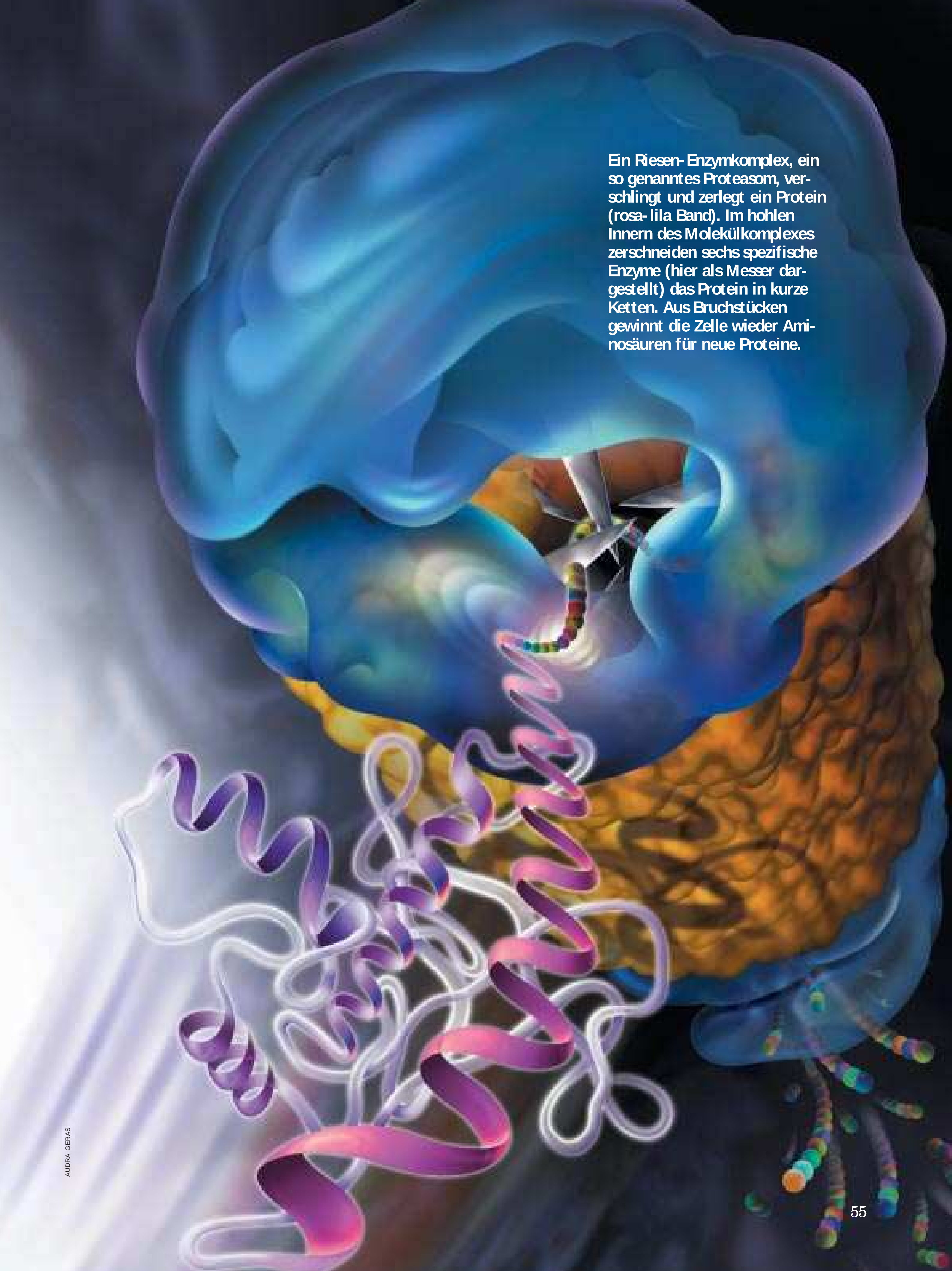
STECKBRIEF

Proteine („Eiweißmoleküle")
Sie stellen eine der wichtigsten Stoffklassen von Organismen dar. Sie bestehen aus einer Kette von Aminosäuren, deren Abfolge die Gene codieren. Enzyme sind spezielle Proteine für den Stoffwechsel. Sie katalysieren die chemischen Reaktionen.

Proteasen
Diese Enzyme „verdauen" (zerlegen) Proteine. In den Zellen stecken sie in Proteasomen, sodass sie nicht unkontrolliert wichtige Proteine zerstören können.

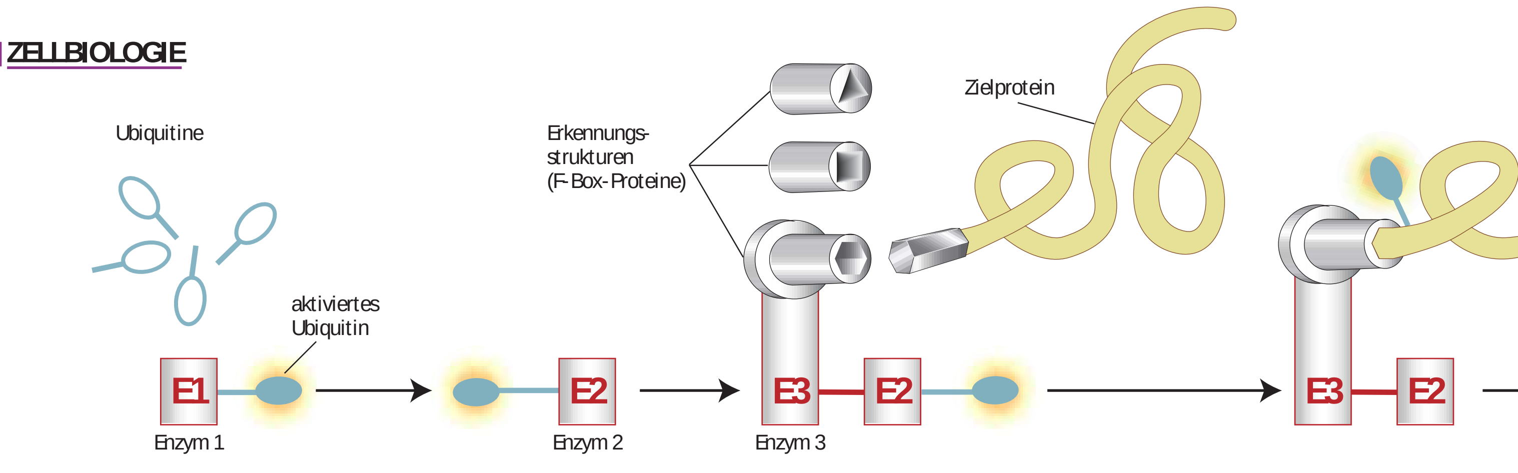
Proteasom
Diese regelrechten „Mülltonnen" aus vielen Proteasen zerlegen Proteine wieder in kurze Stücke.

Ubiquitin
Die Zellen kennzeichnen zu vernichtende Proteine mit einer Kette aus diesen Molekülen.



Ein Riesen-Enzymkomplex, ein so genanntes Proteasom, verschlingt und zerlegt ein Protein (rosa-lila Band). Im hohlen Innern des Molekülkomplexes zerschneiden sechs spezifische Enzyme (hier als Messer dargestellt) das Protein in kurze Ketten. Aus Bruchstücken gewinnt die Zelle wieder Aminosäuren für neue Proteine.

AUDRA GERAS



des Körpers vor und stecken voller Verdauungsenzyme. Doch einige Zellen besitzen keine Lysosomen und wissen dennoch abnorme Proteine schnell zu zerstören. Das gilt zum Beispiel für Bakterien und für unreife rote Blutkörperchen, wie einer von uns (Goldberg) Anfang der siebziger Jahre erkannte. Sie mussten über einen damals noch unbekannten Mechanismus der Proteinentsorgung verfügen. Ungewöhnlicherweise schienen die Zellen bei dem Abbau Energie zu verbrauchen.

Goldbergs Team gelang es, den mysteriösen Vorgang im Reagenzglas ablaufen zu lassen, sodass er sich nun genauer untersuchen ließ. Mehrere Forschergruppen entdeckten Ende der siebziger und in den achtziger Jahren die einzelnen Enzyme, die bei diesem Abbau mitwirken. Aber erst 1988 erkannten zwei Wissenschaftlergruppen – um Goldberg und um Martin C. Rechsteiner von der Universität von Utah in Salt Lake City –, dass diese Enzyme zu gewaltigen Multi-Enzymkomplexen zusammengefasst sind. Weil diese Riesenkomplexe zahlreiche proteinverdauende Enzyme enthalten, so genannte „Proteasen", nannte Goldbergs Arbeitsgruppe das Gebilde „Proteasom". Dieses ist ungefähr hundertmal größer und vor allem auch wesentlich komplexer gestaltet als einzelne Proteasen.

Dass unsere Zellen fortwährend eigene Moleküle zerstören, deren Herstellung doch sehr aufwendig ist, mag als grobe Verschwendung erscheinen. Doch die Entsorgung ist in vieler Hinsicht unverzichtbar. Auf solche Weise pflegen Zellen biochemische Reaktionen, die eben noch nötig waren, wieder aufzuhalten oder einzuschränken: Sie vernichten oft einfach ein dabei entscheidendes Enzym oder regulatorisches Protein.

Und umgekehrt: Um einen Prozess in Gang zu bringen, den im Augenblick ein bestimmtes Hemmprotein unterbindet, zerstören Zellen kurzerhand dieses Hemmnis – als ob man den Stöpsel aus der Badewanne zieht. Ein gut untersuchtes Beispiel dafür, dass manche solcher Proteine zu gegebener Zeit ganz schnell wieder verschwinden müssen, ist der „Zellzyklus" im Zusammenhang mit der Zellteilung – ein hochkomplexer Vorgang, bei dem sich unter anderem das Erbmaterial verdoppelt und dann auf zwei Zellen aufteilt (siehe Kasten Seite 58).

Segen und Fluch von Putzkolonnen

Nicht nur die einzelnen Zellen, auch der Organismus als Ganzes reguliert seinen Stoffwechsel in mancher Hinsicht über einen Proteinabbau. Bei Krankheit oder schlechtem Ernährungszustand holt der Körper sich Energie aus Muskelproteinen. In den Muskelzellen arbeitet dann die Maschinerie rund um die Proteasomen auf Hochtouren. Aus den gewonnenen Aminosäuren wird Traubenzucker (Glucose) hergestellt und verbrannt. Darum verlieren Kranke und Hungernde so viel Muskelmasse und fühlen sich schwach. Charakteristisch ist dies für Patienten mit Krebs in fortgeschrittenem Stadium, mit Aids oder mit unbehandeltem Diabetes.

In anderer Weise nutzt das Immunsystem den Reißwolf aus Enzymen. Die Abwehr ist ständig auf der Suche nach gefährlichen Zellen im Körper, die vernichtet werden sollten, seien diese von Viren infiziert oder zu Krebszellen entartet. Dazu prüft das Immunsystem unablässig gewisse Moleküle auf den Zelloberflächen, die von den Zellen wie ein Ausweis vorgezeigt werden. Der Vorgang erinnert ein wenig an eine misstrauische Zimmerwirtin, die täglich den Müll ihrer Mieter durchwühlt. Die Ausweismoleküle stammen von in Proteasomen zerlegten Proteinen. Zwar werden die meisten der Moleküle, die den Müllschlucker passieren, am Ende vollständig in ihre einzelnen Aminosäuren zerlegt. Doch bleiben auch ein paar etwas längere Stücke von acht bis zehn Aminosäuren zurück. Die schnappt sich die Zelle und „präsentiert" sie an ihrer Oberfläche den Immunzellen (Bild auf Seite 59). In bestimmten Organen, etwa der Milz und den Lymphknoten, ebenso bei Krankheit, treten sogar besondere „Immuno-Proteasomen" auf. Sie machen den Kontrollmechanismus noch effizienter.

Auch die Zellen selbst nutzen den Proteinabbau durch Proteasomen für den Qualitäts-Check ihres Innenlebens, damit sich fehlgestaltete, möglicherweise schädliche Proteine nicht in ihnen anhäufen. Sowohl Säugetierzellen als auch Bakterien zerstören selektiv zellinnere Proteine mit stark abweichender Gestalt, wie sie bei Mutationen, Fehlern bei der Synthese oder nachträglicher Beschädigung auftreten können.

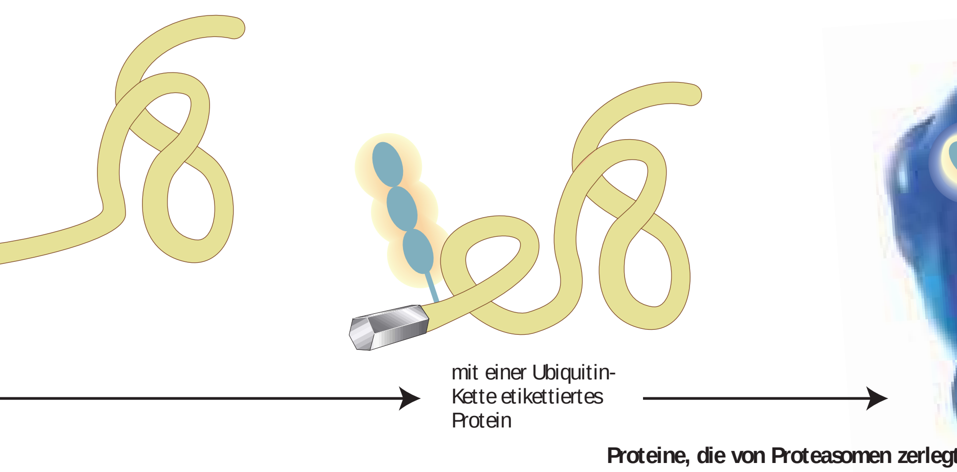
Für eine Reihe menschlicher Erbkrankheiten ist charakteristisch, dass bestimmte frisch gebildete – eigentlich wichtige – Proteine sogleich wieder vernichtet werden, weil sie mehr oder weniger abnorm aussehen. Zum Beispiel können sich bei verschiedenen erblichen Anämien Moleküle für den roten Blutfarbstoff Hämoglobin nicht richtig falten. Diese Moleküle werden bald nach ihrer Synthese wieder in den Proteasomen zerlegt. Gleiches gilt für die Mukoviszidose (zystische Fibrose). Bei diesem Erbleiden funktioniert die Sekretion der Zellen unzureichend. Die Verdauungsdrüsen arbeiten deswegen nicht normal, und in den Lungen sammelt sich ein zäher Schleim. Proteine, die sich eigentlich als Tunnel in die äußere Zellmembran einbauen sollten, um dann Chlorid-Ionen auszuschleusen, weisen leichte

Literaturhinweise

Probing the Proteasome Pathway. Von A. L. Goldberg in: Nature Biotechnology, Bd. 18., Heft 5, S. 494, 18. Mai 2000.

Intricacies of the Proteasome. Von Stu Borman in: Chemical and Engeneering News, Bd. 78, Heft 12, S. 43, 20. März 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter ***www.spektrum.de***



Proteine, die von Proteasomen zerlegt werden sollen, erhalten dafür eigens eine Markierung. Das bewerkstelligen drei Enzyme, E1 bis E3 genannt. Sie heften an das überflüssige Protein eine Kette aus „Ubiquitin"-Molekülen. Den ersten Schritt vollzieht E1: Es aktiviert ein Ubiquitin, indem es sich daran bindet. E2 dient als Überbringer: Es nimmt dem ersten Enzym das aktivierte Ubiquitin ab und dockt mit ihm im Schlepptau an E3 an. E3 wiederum tritt in vielen Gestalten auf – sozusagen mit austauschbaren Köpfen –, die wie Steckschlüssel zu bestimmten Zielmolekülen passen. Wenn E3 das passende Zielprotein gefunden hat, wird an dieses das Ubiquitin angelagert. Dieser Ablauf wiederholt sich, bis an dem Zielprotein eine Kette von Ubiquitinen hängt. Diese Kette bindet sich an ein Proteasom, wo andere Enzyme in dessen Eingangsbereich das Zielprotein entfalten und in das Innere befördern.

Defekte auf (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/96, S. 32). Die Proteasomen bauen diese Moleküle ab, bevor sie die äußere Zellmembran erreichen.

Bei anderen Krankheiten wiederum greifen die Proteasomen möglicherweise nicht genug durch. Zum Beispiel bilden sich bei bestimmten neurodegenerativen Erkrankungen wie Parkinson, Corea Huntington oder Alzheimer, bei denen Hirnmasse verloren geht, in bestimmten Nervenzellen des Gehirns Klümpchen missgestalteter Proteine – so genannte Plaques – zusammen mit Proteasomen. Aus irgendwelchen Gründen scheinen die Gehirnzellen dieser Patienten es nicht zu schaffen, die anormalen Proteine abzubauen (siehe auch: „Hilfe bei Alzheimer", Spektrum der Wissenschaft 3/01, S. 44).

Abfalltonne für Recycling

Wie Proteasomen molekular aussehen, wissen die Forscher inzwischen recht genau. Im Vergleich zu durchschnittlichen Proteinen wirken diese Komplexe riesengroß. Die Molekülmasse vieler Proteine beträgt zwischen 40000 und 80000 Dalton (ein Dalton entspricht der Masse eines Wasserstoffatoms). Die meisten Proteasomen höherer Organismen bringen aber zwei Millionen Dalton auf. Ein Wissenschaftlerteam unter Leitung von Wolfgang Baumeister und Robert Huber vom Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München beschrieb Mitte der neunziger Jahre die molekulare Architektur des Riesenkomplexes. Die Forscher hatten das Supermolekül mit Röntgenstrukturanalyse und elektronenmikroskopisch untersucht (Spektrum der Wissenschaft 7/95, S. 24). Wie sie zeigten, besteht ein Proteasom aus einem größeren tunnelartigen Kernbereich – dem „Verdauungstrakt" – und ein oder zwei etwas kleineren Teilen mit Regulator-Funktion. Letztere sitzen an einem oder beiden Enden der Röhre wie Deckel. Den Kernkomplex bilden vier aufeinander gestapelte Ringe aus jeweils sieben Untereinheiten. Diese enthalten die Enzyme. Die beiden äußeren dieser Ringe fungieren anscheinend als Sperren, die verhindern, dass herumirrende Proteine versehentlich in die Abbaukammer geraten.

Die „Deckel" dürften als hochselektive Wächter den Zugang zum Kernkomplex kontrollieren. Sie erkennen nämlich solche Proteine, die zerlegt werden sollen und bereits entsprechend gezeichnet sind. An diese Proteine binden sie sich, entfalten sie dann – wozu sie Energie aufwenden – und schieben die Aminosäurekette in den „Magen" des Proteasoms, also gewissermaßen in den Reißwolf.

Wegen ihrer lebenswichtigen Bedeutung gelten Proteasomen als ein gutes Ziel, um Krankheiten zu behandeln. Forscher konnten schon mehrere Substanzen isolieren oder synthetisieren, die selektiv Proteasomen hemmen, andere zelluläre Enzyme also nicht beeinträchtigen.

Es wundert wohl nicht, dass Zellen nicht lange überleben, wenn sie mit solchen Hemmstoffen („Inhibitoren") überschwemmt werden. Wichtig für zukünftige Therapien erscheint aber, dass Krebszellen anscheinend noch empfindlicher reagieren als gesunde Zellen. Hierauf deuten Studien an Tieren und an menschlichen Zellkulturen hin. Die Firma Millennium Pharmaceuticals in Cambridge (US-Bundesstaat Massachusetts) hat schon einen künstlichen Hemmstoff für Proteasomen am Menschen auf seine Verträglichkeit geprüft. Die Substanz soll nun versuchsweise Krebskranken verabreicht werden, unter anderem Patienten mit multiplem Myelom. Ein weiterer von dieser Firma entwickelter Proteasom-Inhibitor könnte bei Schlaganfall und Herzinfarkt eingesetzt werden. Diese Substanz durchläuft gerade die ersten Sicherheitsprüfungen an Menschen.

Mit Hilfe von spezifischen Hemmsubstanzen vermochten Wissenschaftler auch aufzuklären, was rund um das Zerstörungswerk durch den Proteasom-Komplex im Einzelnen geschieht – also auch, was zeitlich davor abläuft. Die Saubermänner ergreifen nämlich nicht einfach wahllos irgendwelche herumschwirrenden Proteine. Vielmehr packen ▶

sie nur solche Moleküle, welche die Zelle vorher dazu bestimmt hat.

Bei weitem die meisten Proteine, die in die Falle gehen, wurden eigens markiert. Und zwar verpasst die Zelle ihnen ein sehr auffälliges Anhängsel: eine lange Kette aus „Ubiquitin“-Proteinen (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/96, S. 70). Ubiquitin ist ein recht kleines Molekül aus nur 76 Aminosäuren, das in den verschiedensten Organismen vorkommt, daher der Name (lateinisch *ubique* bedeutet: „überall“). Der Ubiquitin-Schwanz hilft wie eine Postleitzahl, das überflüssige Protein schneller einem Proteasom zuzuführen. Denn die Zelle ist darauf angewiesen, dass unnötige Moleküle genau zum richtigen Zeitpunkt vernichtet werden. Das bestimmen aber nicht etwa die Proteasomen selbst. Vielmehr ist für das richtige Timing maßgeblich, wann das Protein seine Ubiquitinkette erhält. Auch für diese „Ubiquitinierung“ muss die Zelle Energie aufwenden. Die wesentlichen Grundzüge des Ablaufs klärten israelische Forscher in Zusammenarbeit mit einem amerikanischen Labor auf.

Bei der Markierung wird dem Protein die Ubiquitinkette Glied für Glied angehängt, wobei jedes Mal mehrere Schritte ablaufen. Die Zelle benötigt dazu drei Enzyme, kurz E1 bis E3 genannt, die nacheinander zum Zuge kommen (Bild Seite 56/57). Enzym 1 aktiviert zuerst einmal ein einzelnes Ubiquitin-Molekül und übergibt es an Enzym 2. Dieses nimmt die Hilfe von Enzym 3 in Anspruch, um das Ubiquitin am Zielmolekül anzubringen. Denn E3 kann identifizieren, welche Proteine ausgemustert werden müssen. Der gleiche Vorgang wiederholt sich, bis an dem Protein schließlich eine lange Ubiquitinkette hängt. Eben diese Kette wird dann von einem Proteasom erkannt.

Alles kommt also darauf an, welchem Protein Enzym 3 sozusagen den Todeskuss gibt. Woran merkt E3, welche Moleküle die Zelle nicht brauchen kann? Erst kürzlich fanden Forscher heraus – darunter zwei von uns (Elledge und Harper) –, dass E3 in Hunderten verschiedener Gestalten auftritt. Diese Heerschar von E3s erkennt Zielproteine, die markiert werden müssen, offenbar an bestimmten Informationen in deren Aminosäuresequenzen, zum Beispiel am Ende der Aminosäurekette.

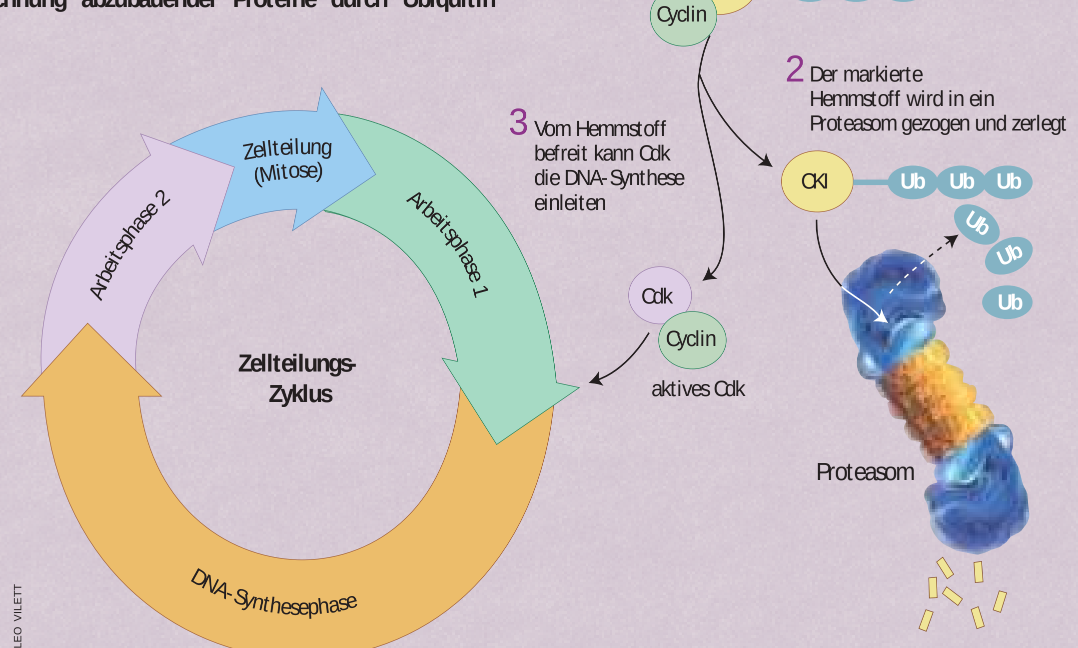
Das richtige Timing: ohne Vernichtung keine Zellteilung

Bäckerhefe macht mit ihrer Zellteilung vor, wie ausgediente Proteine zu einem bestimmten Zeitpunkt dieses zyklischen Geschehens ausgemerzt werden. Vor jeder Teilung muss die Zelle beispielsweise ihr Erbmaterial, ihre DNA, verdoppeln (gelb gezeichnete Phase des Zellzyklus). Zu diesem Zweck muss sie zunächst eine bestimmte Klasse von Proteinen aktivieren, und zwar Doppelmoleküle aus „Cyclin“ und einer „cyclin-abhängigen Kinase“ (Cdk). Weil diese speziellen Doppelmoleküle in der so genannten DNA-Synthesephase des Zellzyklus agieren, heißen sie „S-Phase-Cdks“.

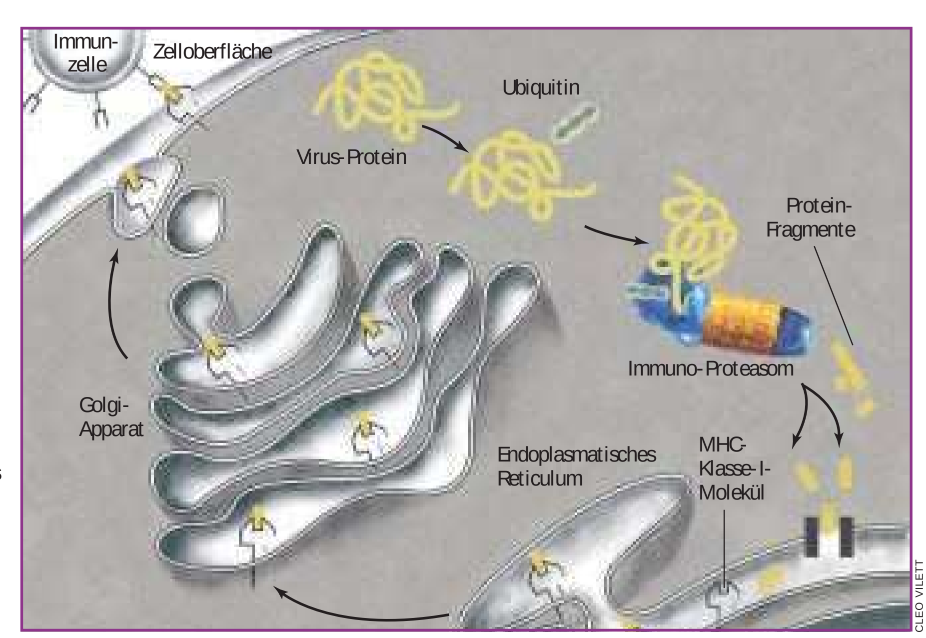
Bis zu diesem Zeitpunkt hemmt ein anderes Protein das Doppelmolekül aus Cyclin und Kinase. Dieser „Inhibitor“ heißt entsprechend „CKI“. Er entstand während der letzten Zellteilung. Nun verpasst die Zelle ihm als Zeichen, dass er vernichtet werden muss, ein Anhängsel aus Ubiquitin (Ub). Proteasomen erkennen derart gezeichnete Moleküle und zerstören sie (Bildsequenz in diesem Kasten).

Wie sonst auch, muss im Zellzyklus die Kennzeichnung abzubauender Proteine durch Ubiquitin streng geregelt geschehen. Sonst gerät die Zellteilung außer Kontrolle. Das geschieht bei manchen Krebsarten. Für einen geregelten Ablauf sorgen die E3-Enzyme. Sie besitzen sozusagen einen austauschbaren Kopf: die „F-Box-Proteine“. Der ganze Komplex wird auch „SCF“ genannt. Die Köpfe erkennen wie Steckschlüssel spezifische Proteine, die zur Vernichtung vorgesehen sind.

Die Kopfstücke scheinen in Hunderten von Ausführungen vorzukommen. Der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* etwa besitzt über 217 verschiedene solche F-Box-Proteine. Von menschlichen Zellen kennen Wissenschaftler bereits mehrere Dutzend, und die Zahl wächst. Die vielen verschiedenen E3-Enzyme helfen der Zelle, stets genau die richtigen Proteinsorten und -mengen zur Verfügung zu haben. Diese Molekülgruppe übt nicht nur Aufsicht über die Zellteilung, sondern unter anderem auch über Proteine, die Gene anschalten.



CLEO VILETT



Immunzellen müssen krebskranke und von Viren befallene Zellen erkennen. Sie identifizieren solche kranken Zellen anhand von fremdartigen Proteinbruchstücken, welche die Zellen ihnen an ihrer Oberfläche vorzeigen. Solche Bruchstücke liefern die Proteasomen. Das Bild zeigt, wie ein virales Protein markiert wird und dann in den Reißwolf gerät. Kurze Fragmente aus acht bis zehn Aminosäuren werden anschließend an gabelartige Gebilde gehängt („MHC-Moleküle der Klasse I"). Diese Moleküle nehmen die viralen Bruchstücke mit zur Zelloberfläche.

Die E3-Enzyme lesen sozusagen an bestimmten Stellen des Moleküls, ob es ausgemustert werden muss. In Notzeiten hängt die Zelle Proteinen oft Phosphatgruppen an. Das kann die Aktivität eines Proteins beeinflussen oder seine Bindungsfähigkeit an ein Enzym 3 verändern. Die Gruppe der E3s erkennt auch Proteine, die sich nicht falten konnten oder beschädigt wurden. Sie alle versieht E3 mit einer Etikette, die besagt; „Müll!"

Generell sind Zellen für viele biochemische Schlüsselprozesse darauf angewiesen, dass die beteiligten Proteine korrekt funktionieren. Voraussetzung dafür ist, dass diese Moleküle ordnungsgemäß aufgebaut und entsprechend stabil sind. Deswegen kommt es entscheidend auf die Mechanismen an, welche die Kontrolle über die Protein-Stabilität ausüben und über ihre Existenz oder Vernichtung bestimmen. In diesem Sinne regulieren die E3-Proteine viele zelluläre Vorgänge. Ihr Einflussbereich umfasst beispielsweise die Ausbildung von Armen und Beinen beim Embryo, die Immunantwort, die Zellteilung und die Kommunikation zwischen Zellen. E3-Proteine diktieren sogar den Tag-Nacht-Rhythmus. Sie bestimmen auch, wann Pflanzen blühen.

Der Einfluss dieser Enzyme reicht bis hin zum Krebs. Manche stellen Tumor-Suppressoren oder Onkogene dar. Ob Zellen entarten, steht dann sozusagen in ihrer Macht. Ein Beispiel ist der nach seinem Entdecker benannte Tumorsuppressor VHL (Von-Hippel-Lindau). Dieses E3-Enzym hilft normalerweise, die Neubildung von Blutgefäßen in Geweben zu begrenzen. Tumoren aber benötigen zum raschen Wachsen eine reichliche Blutversorgung. Bei Nierentumoren ist VHL oft mutiert, sodass es der Wucherung entarteter Zellen nicht entgegen steht.

Als ein anderes Beispiel für eine E3-Mutation mit verheerenden Folgen wurde kürzlich eine erbliche Form von Parkinson erkannt: In diesem Fall können sich wegen der Mutation in bestimmten Gehirnzellen Proteine ablagern, was die Zellen schädigt und schließlich zu Grunde richtet.

Das lästige Molekül erhält den Todeskuss

Viren sind ohnehin dafür bekannt, dass sie zelluläre Prozesse für ihre eigenen Zwecke manipulieren. Die winzigen Erreger, die kaum als lebendige Wesen bezeichnet werden dürfen, nutzen die Maschinerie der Proteasomen und ihrer Zulieferer besonders trickreich. In dieser Weise agieren etwa menschliche Papillomaviren. Sie können Warzen, aber auch Krebs hervorrufen, etwa im Genitalbereich. Normalerweise verhindert den Ausbruch von Krebs eines der landläufigen Tumorsuppressor-Proteine, das bekannte Protein p53. Die Papillomaviren nun umgehen dieses Schutzsystem trickreich: Sie stellen ein Protein her, das sich gleichzeitig an p53 und an ein E3 bindet. So erhält p53 einen Ubiquitinschwanz und wird vernichtet.

Ganz ähnlich mogelt HIV. Das menschliche Immunschwächevirus benötigt ein bestimmtes Oberflächenprotein auf Immunzellen, um sie zu befallen. Doch später ist genau dieses Molekül ihm bei der Vermehrung hinderlich und wird beseitigt. Beim Eindringen dockt das Virus an das betreffende Molekül, CD4, an, und zwar mit einem vorstehenden Protein, gp160. Natürlich würde CD4 später, wenn die infizierte Zelle neues Virusmaterial synthetisiert, dieses virale Protein auch erkennen und abfangen. HIV weiß dem vorzugreifen: Seine Waffe heißt Vpu: Wie im vorigen Beispiel bindet sich dieses Virusprotein an den Feind und gleichzeitig an einen Komplex mit einem E3-Enzym: Das lästige CD4 erhält den Todeskuss.

Gerade jetzt entdecken Wissenschaftler immer mehr Zusammenhänge zwischen den E3-Proteinen und Krankheiten. So wie den Proteasomen selbst gilt auch ihren einflussreichen Zulieferern die Aufmerksamkeit der pharmazeutischen Forschung. Begeisterung löste jüngst die Entdeckung aus, dass die E3-Enzyme in großen Familien daherkommen, also in Gruppen von untereinander ähnlichen Molekülen. Die zukünftigen Arzneien, die auf diese Enzyme abzielen, dürften hochspezifisch agieren und darum wenig Nebenwirkungen aufweisen, denn von den vielen E3-Enzymen ist jedes speziell für eine Hand voll Proteine zuständig.

Das alles eröffnet nicht nur der Medikamenten-Entwicklung völlig neue Wege. Auch das Verständnis des Zellgeschehens wird davon profitieren. Wie eng das Leben mit den Tod verknüpft ist, in dem Fall dem Protein-Tod, macht die Forschung über Proteasomen eindrucksvoll klar. ■

Alfred L. Goldberg, Stephen J. Elledge *und* ***J. Wade Harper*** *erforschen den Proteinabbau in Zellen und dessen Bedeutung bei Erkrankungen. Goldberg hat an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) eine Professur für Zellbiologie. Elledge ist Robert-A.-Welch-Professor für Biochemie am Baylor College für Medizin in Houston (Texas) und forscht am Howard Hughes Medical Institute in Chevy Chase (Maryland). Auch Harper hat am Baylor College eine Professur.*



Handprothesen

Druckluft in den Fingern

Ein so komplexes Gebilde wie die menschliche Hand nachzubauen, ist eine schwierige Aufgabe. Neuartige Antriebselemente, die mit Druckluft oder hydraulisch arbeiten, und eine „intelligente“ Steuerung erlauben den Bau von Handprothesen, die dem natürlichen Vorbild näher kommen – und das bei geringerem Gewicht als herkömmliche Geräte.



Von Stefan Schulz, Christian Pylatiuk und Georg Bretthauer

Warum reicht Ihr mir die Linke? Bin ich die ritterliche Rechte nicht wert?

Und wenn Ihr der Kaiser wärt, Ihr müßtet mit dieser vorlieb nehmen. Meine Rechte, obgleich im Kriege nicht unbrauchbar, ist gegen den Druck der Liebe unempfindlich; sie ist eins mit ihrem Handschuh; Ihr seht, er ist Eisen.

Johann Wolfgang von Goethe, Götz von Berlichingen, 1773

Mit diesen Worten erklärt Götz von Berlichingen (1480–1562) in Johann Wolfgang von Goethes gleichnamigem Drama, warum er Martin Luther zum Abschied die linke Hand reicht: Dem Reichsritter war die Rechte im Landshuter Erbfolgekrieg 1504 abgeschlagen worden. Er ließ eine „Funktionsprothese" anfertigen: Ihre metallenen Finger und das Handgelenk konnte Götz arretieren, etwa um ein Schwert zu führen (siehe Bild Seite 63).

Fast 500 Jahre später verliert ein anderer Ritter seine Hand beim Schwertkampf; doch dieser moderne Ritter hat mehr Glück: Eine fortschrittlichere Prothese, die operativ mit dem verbliebenen Unterarmstumpf verbunden wird, ersetzt alle Funktionen der gesunden Gliedmaße und lässt sich auch über Nervenimpulse steuern.

Leider verfügen Ärzte und Ingenieure der Erde noch nicht über eine solche Technologie, wie sie dem Jedi-Ritter Luke Skywalker in der Trilogie „Krieg der Sterne" zuteil wird. Obwohl etwa einer Million Menschen weltweit eine Hand fehlt: Heutige Prothesen ähneln trotz aller Elektronik nach wie vor eher der Götzschen Eisenhand. Zwar existieren bereits künstliche Manipulatoren mit enormer Beweglichkeit, doch sie wären keinem Patienten von Nutzen – ohne einen steuernden Hochleistungsrechner bleiben sie starr und steif. Mit ihrer Vielzahl von Antriebselementen (fachlich „Aktoren") sind diese Roboterhände zudem schwer, groß und unhandlich.

Im September 1998 gelang es erstmals, eine Hand zu transplantieren. Für die meisten Betroffenen dürfte aber auch das keine Lösung sein, denn die Operationen sind äußerst aufwendig und passende Spenderorgane nur schwer zu finden. Zudem ruft die verpflanzte Haut so starke Immunreaktionen hervor, dass die Patienten ihr Leben lang nebenwirkungsreiche Medikamente nehmen müssen.

Dieser unbefriedigende Zustand verwundert allerdings nicht, denn die Hand ▶

ATELIER KÜHN

Steckbrief

Handprothesen sind dem natürlichen Vorbild kaum vergleichbar: Funktionelle Prothesen erlauben nur wenige und recht mechanisch anmutende Bewegungen, zudem sind sie meist ziemlich schwer. Ein handähnliches System wäre mehr als wünschenswert, denn der Bedarf ist groß. Allein in Deutschland waren 1999 beim Statistischen Bundesamt 26661 Versehrte registriert, denen eine oder beide Hände beziehungsweise Arme fehlten; europaweit waren es etwa 85000.

Davon hatten 17 Prozent **Arbeitsunfälle** erlitten oder waren auf Grund sonstiger Berufskrankheiten amputiert, 10 Prozent verloren ihre Gliedmaßen bei Verkehrs-, Haus- oder Freizeitunfällen. 37 Prozent der Patienten waren **Kriegsversehrte** und 9 Prozent Opfer der Contergan-Katastrophe vom Anfang der sechziger Jahre.

IAI, FZK

Die Karlsruher Hand kommt der natürlichen etwas näher.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES ORTHOPÄDIE MUSEUMS FRANKFURT

Der Chirurg Ferdinand Sauerbruch entwickelte 1916 diese Prothese, bei der Stifte im Armstumpf die mechanischen Elemente betätigten.

Kriege „fördern“ die Prothetik

ist eines der kompliziertesten biomechanischen Systeme, das die Evolution hervorgebracht hat. Für den Einzelnen wiegt der Verlust der Hand schwer. Dem Vermögen, Gegenstände zu handhaben, verdankt die Menschheit nicht zuletzt ihre Anpassungsfähigkeit an wechselnde Umgebungen im Laufe der Evolution.

Präzision und Feinfühligkeit auf der einen, Kraft und Dynamik auf der anderen Seite – das präzise Zusammenspiel von insgesamt 39 Muskeln der Hand und des Unterarms ermöglicht das Einfädeln eines Fadens, das Streicheln eines Babys, das Halten sowie das Hochschnellenlassen des Körpergewichts mit nur wenigen Fingern beim Sportklettern. Muskeln des Unterarms sorgen für kraftvolle, die der Hand vor allem für präzise Bewegungen. Der Daumen, von acht Muskeln „angetrieben“, dient beim Greifen als Gegenpart zu den anderen vier Fingern.

Auch die Haut ist ein Meisterstück der Evolution. Allein die Greiffläche enthält rund 17000 Sensoren, die Vibrationen, Druck und Scherkräfte, Schmerz und Temperaturen erfassen. Erst ihr Zusammenspiel ermöglicht es, zerbrechliche Gegenstände vorsichtig zu nehmen und die Beschaffenheit ihrer Oberflächen zu erfahren. Obendrein ist die Haut so elastisch, dass sie Bewegungen der Gelenke nicht behindert. Kantige oder spitze Objekte drücken sich in das weiche Unterhautgewebe ein und werden so sicher umschlossen. Spezialisierte Oberflächenstrukturen der Handinnenfläche, die so genannten Papillarleisten, werden von Schweißdrüsen befeuchtet und verbessern dadurch die Haftreibung beim Greifen. Beides zusammen – guter „Formschluss“ und erhöhte Haftung – verringern die für ein sicheres Greifen erforderliche Kraft.

Der Ersatz einer durch Gewalt oder Unfall verlorenen Hand beschäftigt Tüftler und Handwerker seit Jahrhunderten. Sie ersannen kosmetische Prothesen, die zumindest den Anschein der Unversehrtheit geben sollten. So berichtet der Geschichtsschreiber Gajus Plinius Sekundus, der römische General Marcus Sergius habe nach dem Verlust der rechten Hand eine metallene Prothese benutzt, um seinen Schild im Zweiten Punischen Krieg (218–210 v. Chr.) zu halten. Die erwähnte Götzsche Eisenhand gilt als Meisterwerk der Schmiedekunst und Feinmechanik des Mittelalters.

Den ersten Schritt zu einer aktiven, also durch die Kraft des eigenen Körpers angetriebenen Prothese unternahm der Berliner Zahnarzt und Chirurgietechniker Peter Ballif im Jahre 1812. Ein Seilzug aus Darmsaite streckte gegen Federkraft Zeige- bis Kleinfinger, ein zweiter Zug den Daumen. Beide verliefen von einem Brustgurt nahe der Achselhöhle ausgehend zur Hand und spannten sich an, wenn das Ellenbogengelenk gestreckt beziehungsweise der Arm seitlich angehoben wurde. Allerdings war damit keine große Kraft aufzubringen und bei einer ungewollten Armbewegung entfiel ein gegriffener Gegenstand wieder.

Ein großer Schritt nach vorn gelang 1916 dem Chirurgen Ferdinand Sauerbruch (1875–1951) an der Universitätsklinik in Zürich; unter dem Eindruck des Ersten Weltkrieges, der viele Menschen verstümmelte, entwickelte er das nach ihm benannte Verfahren. Sauerbruch formte aus der Haut über dem verbliebenen Bizeps einen Schlauch von etwa einem Zentimeter Durchmesser und fünf Zentimeter Länge und zog ihn mitten durch das rumpfferne Ende des Muskels. Nach etwa zwei Wochen Heilungszeit führte der Arzt durch diesen Kanal einen elfenbeinernen Stift, den er über einen Seilzug mit der mechanischen Hand verband. So konnte der Stift die Kraft des kontrahierenden Bizeps auf eine Prothese übertragen und deren Finger schließen – diesmal gegen eine öffnende Federkraft. Über den Druck der Stifte auf die Haut spürte der Patient zudem, wie stark er „zugriff“.

Diese Art der Prothese war bis Ende der fünfziger Jahre häufig und selbst Anfang der neunziger noch gelegentlich in Gebrauch. Eine optimale Lösung bot sie freilich auch nicht: Um zwischen Daumen und Zeigefinger eine Kraft von 6 Newton auszuüben, musste der Bizeps-Muskel mit 100 Newton am Stift ziehen; sie eignete sich deshalb nur zum Greifen leichter Gegenstände (zum Vergleich: Die Maximalkraft eines gesunden Mannes beträgt beim Zylindergriff 550 Newton, die einer Frau etwa 70 Prozent davon).

Ein weiterer Weltkrieg folgte und Tausende Soldaten und Zivilisten wurden verstümmelt. Oft genug rissen explodierende Minen oder Bomben Hände ab. Um die Greifkraft von Prothesen zu steigern, nutzten Ingenieure die jetzt verfügbaren Elektromotoren und Gasdrucksysteme. Erstere wurden und werden im

O. KARPINSKI, DT. MIL.ÄRZTL. ZTSCHR. HF. 4/5, 1881

Zuggurte übertragen Kräfte auf die so genannte Ballif-Prothese. Diese „Studie über künstliche Glieder“ erschien 1881 in der Deutschen Militärärztlichen Zeitschrift.



FREIHERRL. V. BERLICHINGENSCHES SCHLOSSMUSEUM

UNTEN: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER ORTHOPÄDISCHEN UNIVERSITÄTSKLINIK HEIDELBERG

Die Eisenhand des Götz von Berlichingen (oben) war eine „Funktionsprothese" – der Ritter vermochte damit sein Schwert zu halten. Die in den fünfziger Jahren entwickelte Heidelberger Druckluftprothese (rechts) half Hunderten Patienten im Alltag.

Bereich der „Handfläche" untergebracht und übertragen ihre Kraft über einen Hebelmechanismus direkt an die Finger. Ein herkömmlicher pneumatischer Antrieb hingegen erzeugt eine lineare Bewegung: Ein Ventil öffnet sich auf einen Steuerimpuls hin, und das in einem Speicher komprimierte Gas strömt über eine Versorgungsleitung in einen Kolben, der die Prothesenmechanik bewegt. Wird das Ventil geschlossen, holt beispielsweise eine Feder den Kolben in seine Ausgangsstellung zurück.

Dass Prothetik aber auch ein finanziell lohnendes Geschäft sein muss, erfuhr der Erfinder der elektrisch betriebenen „Vaduzer-Hand" aus Liechtenstein, Edmund Wilms: Obwohl er bis 1953 etwa siebzig Prototypen gebaut und teilweise an Patienten getestet hatte, musste er die Entwicklung mangels Geldgeber einstellen. Doch das orthopädisch-chirurgische Institut F. Guillot in Paris erwarb die Patentrechte und verkaufte die Prothese noch bis in die sechziger Jahre.

Deutlich besser erging es dem Ingenieur Otto Häfner, der seit 1948 an der Orthopädischen Klinik in Heidelberg an einer mit Kohlendioxid betriebenen Hand arbeitete – er fand einen Industriepartner. Bis 1965 wurden alleine in Heidelberg über 350 Personen mit einer pneumatischen Prothese versorgt, darunter sechzig Contergan-Kleinkinder. Ein Patient musste allerdings immer ein bis zwei Kohlensäure-Druckgasflasche mittragen. Sie reichten nach Angaben der Hersteller zwei bis fünf Tage, unseren Berechnungen nach aber nur wenige Stunden. Weil Elektromotoren immer kleiner und leistungsfähiger wurden, geriet Häfners Hand Ende der sechziger Jahre allmählich außer Gebrauch.

Muskeln steuern Motoren

Fremdkraftprothesen ähneln deshalb heutzutage fast immer der Vaduzer-Hand. Zur Steuerung ihrer Elektromotoren spannt und entspannt der Versehrte Muskeln am Armstumpf. Weil die Kontraktion im Körper durch elektrische Signale gesteuert wird, können Elektroden diese in der Summe als „Myogramme" auf der Haut abgreifen, vergleichbar der Aufnahme eines Elektrokardiogramms bei der Herzdiagnostik. Eine Elektronik wertet die Signale aus. Derzeit werden bei Erwachsenen meist nur zwei Elektroden verwendet, da jeweils ein Muskel isoliert abgegriffen werden muss, um ein differenziertes Signal zu erhalten (Kinderprothesen steuern das Öffnen mit nur einer Elektrode).

Die Grundfunktionen „Hand-Öffnen" und „Hand-Schließen zum 3-Punkte-Griff" (Bild nächste Seite) besorgt ein Motor. Dazu wird ein Schwellenwert vorgegeben: Überschreitet das Signal einer myoelektrischen Elektrode diesen Wert, wird der zugehörige Motor aktiv. Werden zudem zeitliche Verläufe und Amplituden der Steuersignale bestimmt, öffnet und schließt die Prothese unterschiedlich schnell und stark (proportionale Steuerung). Einige Prothesen bieten mit einem zweiten Motor auch noch „Handgelenk-Rotieren" oder „Hand-Schließen ohne Daumenbeteiligung zum Hakengriff"; bei nur zwei Elektroden dient deren Summensignal zum Umschalten in den entsprechenden Modus.

Die Nachteile der kommerziellen Systeme sind schnell aufgezählt. Elek- ▶



Die meisten Griffe der Hand lassen sich auf wenige Basisformen zurückführen. Die Karlsruher Roboterhand beherrscht diese Grundgriffe und kann einzelne Finger unabhängig von den anderen bewegen.

Zylindergriff

Drei-Punkt-Griff

Bewegen eines einzelnen Fingers

Hakengriff

ALLE BILDER DER DOPPELSEITE: IAI, FZK

tromotoren und Getriebe bringen einiges auf die Waage, insgesamt wiegt eine solche Prothese rund 800 Gramm, mit der Zusatzfunktion „Handgelenk-Drehen“ sogar 1100 Gramm. Je kürzer der Armstumpf, desto länger der Hebel. Viele Patienten klagen deshalb über Druckstellen, Muskelermüdungen und Fremdkörpergefühl. Die Konsequenz: Etwa dreißig Prozent der Personen mit einer solchen Handprothese tragen sie nicht regelmäßig. Eigene Befragungen ergaben zudem, dass nicht wenige Versehrte mit der Funktionalität der Systeme und den unnatürlich wirkenden Bewegungsmustern unzufrieden sind.

Vielleicht aus diesen Gründen werden häufig keine funktionellen, sondern rein kosmetische Prothesen verschrieben. Viele Invaliden kommen nach eigenen Angaben auch ganz ohne Prothese gut zurecht, und gerade ältere Personen möchten sich nicht mehr an die Bedienung eines technischen Hilfsmittels gewöhnen. Tatsächlich erfordert die Steuerung durch Myogramme einen erheblichen Trainingsaufwand.

Weniger Gewicht, mehr Funktionen und natürliche Bewegungsmuster – die Kombination neuartiger Techniken, die wir am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt haben, bringt uns diesem Ziel näher. Es mag überraschen, dass die Karlsruher Arbeitsgruppe dabei wieder auf die „Fluidik“ zurückgreift, also gasförmige oder flüssige Medien zur Übertragung von Kräften nutzt (die Fluidik umfasst Pneumatik und Hydraulik). Doch Fluidaktoren haben gegenüber elektrischen Antrieben einen großen Vorteil: Sie vermögen große Kräfte bei geringem Eigengewicht mit hoher Dynamik zu übertragen – ein Elektromotor gleicher Leistung wäre vielfach schwerer.

Statt starrer Kolben als Antriebselemente verwendet unsere Arbeitsgruppe aber „flexible Fluidaktoren“. Schon 1872 schlug Franz Reuleaux, Rektor der Berliner Gewerbeakademie (später „Königlich Technische Hochschule Berlin“) einen Gummischlauch als Muskelersatz vor; seit Ende der fünfziger Jahre gibt es solche Antriebe für Armprothesen zu kaufen und seit den siebziger Jahren auch für große Industrieroboter.

Für Handprothesen eignen sie sich leider nicht, denn sie benötigen unpraktische Mindestlängen. So verkürzt sich der schlauchartige „McKibbenmuskel“, ein häufig eingesetzter Aktor, um ungefähr 20 Prozent. Um einen künstlichen Finger mit ausreichend großer Kraft um 90 Grad zu beugen, ist bei Aktoren, die klein genug wären, um in der Hand untergebracht zu werden, aber ein Hub von vier Zentimetern erforderlich. Dies zeigten Versuche mit einer japanischen Roboterhand. Dazu müsste der McKibbenmuskel mindestens 20 Zentimeter lang sein – zu viel für eine Fingerprothese.

Die von unserer Gruppe entwickelten Antriebe basieren auf einem anderen


Lateralgriff

Prinzip: Ein flexibler Behälter füllt sich mit Gas oder Flüssigkeit, seine Wandung dehnt sich aus und senkrecht zu ihr entsteht ein Druck. Dafür gibt es ein natürliches Vorbild – die rote chilenische Vogelspinne (*Grammostola spatulata*). Sie streckt ihre Kniegelenke, indem sie Körperflüssigkeit in einen Hohlraum presst. Wie bei der Spinne besteht unser Aktor aus mindestens einer Kammer, die über einen Steuerkanal mit dem unter Druck stehenden Medium gefüllt wird; ihre Wände bestehen aus einem biegeelastischen Polymer. Zwischen den Hebelarmen eines Drehgelenks fixiert, erzeugen expandierende Kammern eine Drehbewegung. Die Kraft, die ein solches System entwickeln kann, wächst mit der Größe und – bei paralleler Anordnung – mit der Zahl der Aktoren je Gelenk. Sie steigt auch mit dem Druck im Medium: Sie fällt, je mehr man es komprimieren kann.

Nicht weniger als 18 solcher miniaturisierten Fluidaktoren haben wir verwendet, um eine künstliche Hand zu bauen, deren Finger und Handgelenk sich schon recht natürlich bewegen. Wie beim Menschen besitzt jeder Finger drei Gelenke, von denen die beiden vorderen miteinander gekoppelt sind, das heißt, dass sich beide nur gemeinsam beugen oder strecken. Der Bewegungsumfang ist für alle drei Fingergelenke gleich. Bei einem Luftdruck von einem bar (105 Pascal) beträgt die Beugung je Gelenk beispielsweise 40 Grad und für fünf bar (525 Pascal) 100 Grad; die Gesamtfingerbeugung entspricht dann 300 Grad. Eine Fingerbeugung von 180 Grad und mehr wird beispielsweise bei Zylinder- und Hakengriff benötigt.

Eine Spinne diente als Vorbild

Das Basisgelenk des Daumens unterscheidet sich in seiner Konzeption von denen der anderen Finger, denn es muss einerseits für viele Griffmuster eine Beugung in Oppositionsstellung zu ihnen erlauben, andererseits auch das seitliche Heranführen an den Zeigefinger für den Lateralgriff ermöglichen (der Daumen steht dann dem Zeigefinger nicht gegenüber, sondern zielt auf seine Außenseite, etwa in Höhe des Mittelgelenks). Die Streckung der Finger erfolgt wie bei herkömmlichen Prothesen passiv durch Federelemente. Zusätzliche Bewegungsmuster wie das aktive Beugen und Kippen des Handgelenks lassen sich realisieren, wichtiger ist jedoch, dass das Handgelenk aktiv oder passiv drehbar bleibt.

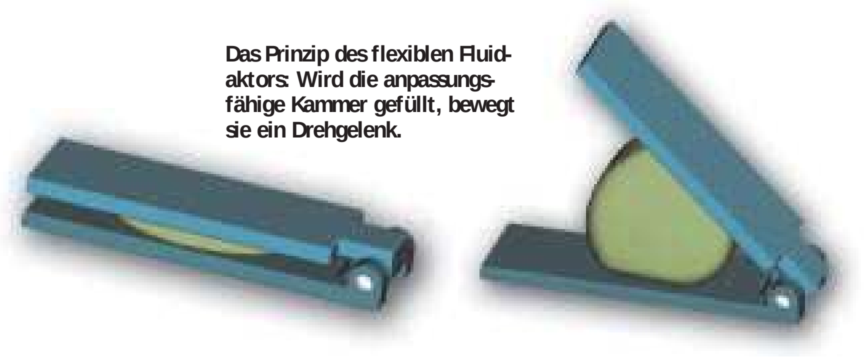
Mit 18 Aktoren, Zuleitungen, Stützstruktur und Gelenken wiegt der erste Prototyp einer solchen Handprothese 360 Gramm. Noch fehlen Mikroventile und eine Mikropumpe. Diese Elemente sollen samt Hochleistungsakkus und Steuerungselektronik innerhalb von etwa einem Jahr auf ein Gewicht von weniger als 300 Gramm kommen. Das wäre zwar nur wenig leichter als herkömmliche Geräte, doch kann dann das Hauptgewicht (Akku und Mikropumpe) innerhalb des Prothesenschafts näher an den Armstumpf verlagert werden, was die Hebelwirkung und damit eine Ermüdung verringert. Die handygroße Pumpe könnte auch außerhalb der Prothese wie ein Walkman getragen werden und diese über einen dünnen flexiblen Schlauch versorgen.

Dank der elastischen Kunststoffe der „Handoberfläche“ schmiegen sich die Finger „formschlüssig“ um den zu greifenden Gegenstand – Kontaktfläche und Haftung werden größer, die erforderliche Kraft geringer. Ein Finger der künstlichen Hand erzeugt beispielsweise bei fünf bar Luftdruck sechs Newton im Bereich der Fingermitte und etwa halb so viel an der Fingerspitze. Die gesamte Haltekraft erreicht dann über 20 Newton. Das ist mehr als genug für alltägliche Arbeiten wie das Halten dieses Heftes oder eines Buches – dafür reichen etwa 12 Newton.

Anschmiegsame Kunsthand

Elastischer Formschluss und flexible Aktoren vereinfachen auch die Steuerung, wie das natürliche Vorbild zeigt: Ein Fingergelenk, das schon durch seinen Aufbau eine natürliche Nachgiebigkeit und Kräfteverteilung in Bezug auf angrenzende Gelenke aufweist, muss nicht exakt in eine bestimmte Position gebracht werden, um seine Funktion zu erfüllen. So auch bei unserem Prototyp: Wird ein Antriebselement aufgepumpt und dreht ein Gelenk, winkelt das nur solange ab, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Antriebskraft und Gegenkräften einstellt (beispielsweise auf Grund der Steifigkeit des gegriffenen Objekts). Dieser Ansatz erlaubt sogar einfache Greifbewegungen ohne elektronische Regelung. Der Einsatz starrer Gelenke hingegen, die jeweils an exakte Positionen gefahren werden müssen, entspräche bei unserem Prototypen etwa der Aufgabe, ein Ei zwischen 18 Schraubstöcke spannen zu wollen und das auf verschiedene Weisen.

Um mehr als einen der Grundgriffe einer gesunden Hand sowie unterschied- ▶


Das Prinzip des flexiblen Fluidaktors: Wird die anpassungsfähige Kammer gefüllt, bewegt sie ein Drehgelenk.

Miniaturroboter

Spinne und Wurm

Die flexiblen und miniaturisierten Fluidaktoren eignen sich für eine ganze Reihe von Anwendungen, beispielsweise in der Robotik: Der „Black Spider“ ist eine mehrbeinige Laufmaschine etwa für Geländeerkundungen. Seine Antriebselemente sind den Beinen der Vogelspinne nachempfunden: Zum Strecken pumpt diese ein Fluidum in die Gelenke.

Ein breites Einsatzgebiet stellt die Medizintechnik. So wurde ein Endoskop mit Fluidaktoren bestückt, das sich nun selbstständig nach dem Bewegungsprinzip des „Inchworms“ fortbewegt:

Je ein Aktor fixiert die Enden des Koloskops an der Darmwand, während drei weitere Fluidaktoren entlang der Längsachse für Bewegungen zuständig sind: Werden sie gleichmäßig befüllt, streckt sich das Koloskop, bei ungleicher Befüllung beugt sich dessen Spitze um bis zu 90 Grad. Wird nun das Ende A im Darm fixiert, schiebt eine Streckung das Ende B in einer Richtung weiter. B wird dann seinerseits fixiert, A gelöst und durch Verkürzen herangeholt – wie ein Wurm hat sich das Koloskop fortbewegt. Die weichen Bauelemente passen sich den unterschiedlichen Durchmessern und Krümmungen des Organs an, wie erste Tests in einem Modell belegen. Mit diesem Koloskop dürfte eine Darmspiegelung keine Schmerzen mehr verursachen, auf die Einnahme von Medikamenten kann der Patient verzichten.

Eine zweite Anwendung in der Medizintechnik ist der Wasserstrahl-Gewebeschneider. Bei diesem Gerät pendelt die Austrittsdüse für einen Hochdruck-Wasserstrahl gleichmäßig hin und her, um Gewebe schonender zu durchtrennen.



Wurmartiges Koloskop für schmerzfreie Darmspiegelung



„Black Spider“ – die pneumatische, mehrbeinige Laufmaschine

BILDER IM KASTEN: IAI, FZK

lich starkes Greifen zu realisieren, reichen diese einfachen Mechanismen aber nicht aus. Vielmehr ist eine intelligente Steuerung vonnöten. Sie verwendet Messfühler und moderne Auswertungsalgorithmen, um die Absichten des Trägers zu erkennen und in passende Bewegungen umzusetzen. Sensoren bestimmen Greifkraft, Fingerstellung und Fluiddruck in der Prothese sowie die myoelektrischen Signale am Armstumpf des Trägers; für Auswertung und Steuerung ist dann ein Mikrocontroller zuständig.

Vor allem in den Fingerspitzen, aber auch in den übrigen Fingersegmenten und im Handteller sollen deshalb Drucksensoren integriert werden, die Aufschluss geben, wo und wie fest ein Gegenstand die Hand berührt. Idealerweise lernt die Steuerung dazu, um immer effizienter zu arbeiten. Zudem arbeitet unsere Gruppe an so genannten unscharfen Steuerungen (Fuzzy Logic), um sozusagen auch die „Zwischentöne“ in den Signalen der wenigen Myoelektroden zu nutzen.

Den Prototyp werden wir im Laufe dieses Jahres im Einsatz, also mit einem Versehrten erproben. Die Prothese fühlt sich bereits viel realistischer an als konventionelle, und die Finger beugen wie bei einer echten menschlichen Hand. Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser Testphase müssen wir einen Partner in der Industrie finden, um das System bis zur Serienreife zu entwickeln.

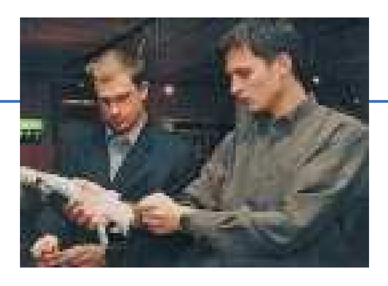
Wird es eines Tages künstliche Hände geben, die so gut wie die natürlichen sind? Wohl kaum. Luke Skywalker müsste auch in Zukunft auf eine solche Prothese verzichten. Doch sie werden dem Vorbild immer ähnlicher. Wenn es erst gelingt, Steuersignale nicht oberflächlich abzugreifen, sondern direkt an Nerven, die zu den noch intakten Muskeln ziehen – wie etwa bei der Neuroprothese „Freehand“ (Spektrum der Wissenschaft 10/1999, S. 100) – oder gar unmittelbar in einem motorischen Zentrum des Gehirns, dann werden der Elektronik sehr viel mehr Informationen zur Verfügung stehen, um Bewegungen zu planen und anzusteuern. Gelingt es darüber hinaus, auf sensorischen Nervenbahnen Informationen über Greifkraft, Oberflächenbeschaffenheit eines berührten Objektes, Finger- und Handposition zu übermitteln, wird die Prothese wirklich ein Teil des Körpers sein – und das nicht nur in einer fremden Galaxis. ■

Literaturhinweise

Die Hand – Werkzeug des Geistes. Von M. Wehr und M. Weinmann (Hg.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1999.

Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex. Von J. K. Chapin et al. in: Nature Neuroscience, Band 2, Heft 7, S. 664, 1999.

A New Class of Flexible Fluidic Actuators and their Applications in Medical Engineering. Von Stefan Schulz, Christian Pylatiuk und Georg Bretthauer in: Automatisierungstechnik, Band 47, Heft 8, S. 390, 1999.



*Der Elektroingenieur **Stefan Schulz** (rechts) leitet seit 1998 das Labor für Fluidische Robotik. **Christian Pylatiuk** (links) ist dort wissenschaftlicher Mitarbeiter. **Georg Bretthauer** leitet das Institut für Angewandte Informatik (IAI) am Forschungszentrum Karlsruhe und lehrt zudem Automatisierungstechnik an der dortigen Universität.*

Die Indianer von La Florida

Nach Ankunft der Europäer dezimierten nicht nur Seuchen, Krieg und Ausbeutung die Ureinwohner Amerikas. Neue bioarchäologische Untersuchungen in der ehemaligen spanischen Kolonie La Florida belegen, dass auch ein drastischer Wandel der Ernährung die Gesundheit der Indianer untergrub.

Von Clark Spencer Larsen

Für die amerikanischen Ureinwohner erwies sie sich als fatal: die Entdeckung der Neuen Welt durch Christoph Kolumbus. Wo immer danach europäische Eroberer Fuß fassten, folgten Krankheit und Tod. So auch an der Südostecke des nordamerikanischen Kontinents, in La Florida. Ostern 1513 von Spaniern entdeckt und getauft, wurde die Halbinsel zwischen Atlantik und Golf von Mexiko bald Schauplatz von gewaltsamen Auseinandersetzungen, sogar von Europäern verschiedener Nation untereinander.

Ihre Taten wie auch ihre Untaten beschrieben die Eroberer ausführlich. Was aber geschah mit der dort heimischen Bevölkerung? Zwar erwähnen die zeitgenössischen Berichte, dass Indianer durch Kämpfe, eingeschleppte Infektionskrankheiten und Zwangsarbeit massenweise umkamen. Doch erst neuerdings brachten bioarchäologische Studien tiefere Einsichten, wie drastisch sich auch der Alltag für die Ureinwohner änderte, sobald sie ständigem fremden Einfluss unterlagen. Eklatant zeigt sich dies in den früheren spanischen Missionszentren von La Florida.

Spanische Franziskaner hatten das 1565 errichtete Fort St. Augustine am Atlantik als Brückenkopf genutzt, um die Region zu christianisieren. Richtung Westen reichte die Kette von Missionsstationen über das Stammesgebiet der Timucua und der Apalachee; nach Norden erstreckte sie sich bis zum Territorium der Guale an der Küste des heutigen Georgia (siehe Karte auf Seite 70). An einigen dieser Orte legten Archäologen die Ruinen großer Kirchen frei, unter deren Böden auch getaufte Indianer bestattet worden waren.

Aus diesen Skeletten konnten Bioarchäologen ein überraschend klares Bild von den Ernährungs- und Arbeitsbedingungen auf den Missionsstationen gewinnen. Die neuen Erkenntnisse – ein Ergebnis des internationalen La Florida Bioarchaeology Project, das ich leite – liefern wichtige Details. Vor allem bele-



JOHN WHITE (LINKS); JACQUES LE MOYNE, BREVIS NARRATIO, 1591 (RECHTS)

„La Florida“, die große Halbinsel im Südosten Nordamerikas, galt unter den spanischen Eroberern als fruchtbares Land. Franziskaner tauften die dort ansässigen Indianer und zogen sie zu schweren landwirtschaftlichen Arbeiten auf den Missionsstationen heran – vor allem zum Anbau von Mais. Zunehmend einseitigere Ernährung mit diesem Getreide, harte Fron sowie unhygienische Verhältnisse setzten schließlich der Gesundheit der Urbevölkerung drastisch zu.

gen sie, dass die Indianer von La Florida sich auf eine Kost umstellen mussten, die fast ausschließlich aus pflanzlichen landwirtschaftlichen Produkten bestand. Sie bekam ihnen nicht sonderlich, beeinträchtigte sogar viele in ihrer Entwicklung und Gesundheit.

Frühere Forschungen zur Ernährung der Ureinwohner Floridas stützten sich auf zwei Arten von Quellen: Aufzeichnungen von Europäern sowie Relikte von Nahrung aus den ausgegrabenen Siedlungen. Doch die Schriftzeugnisse sind widersprüchlich, was die Rolle der Landwirtschaft anbelangt. Ähnliches gilt für die überlieferten Pflanzenreste, zumal sich organisches Material in den feuchten und sauren Böden der Küstenregion kaum erhält.

Immerhin gelang es C. Margaret Scarry von der Universität von North Carolina in Chapel Hill und Donna Ruhl von der Universität von Florida nachzuweisen, dass sich die Indianer von zahlreichen Wild- und Kulturpflanzen ernährten, und zwar vor und nach der Kolonisation. An prähistorischen Stätten ebenso wie an Orten, wo Indianer mit europäischen Siedlern in Kontakt kamen, fanden Archäologen zwar auch Körner und Kolben von Mais; doch welchen Anteil das amerikanische Getreide damals an der üblichen Kost hatte, war nicht zu ermitteln.

Der Mensch ist, was er isst

Genauere Aufschlüsse erhofften wir uns von Analysen der sterblichen Überreste, getreulich dem Motto: Man ist, was man isst. Zu Lebzeiten baut nämlich das Knochengewebe Isotope bestimmter Elemente ein, und dies je nach Nahrungstyp in verschiedenen Anteilen. So lässt das Verhältnis der stabilen Kohlenstoff-Isotope C-12 und C-13 erkennen, bei wem mehr Mais auf dem Speiseplan erschien. Denn die Pflanze enthält einen relativ höheren Anteil des schwereren Isotops, weil sie einen bestimmten, effizienten Weg der Photosynthese nutzt. Zwar tun dies auch noch andere Pflanzen, doch praktisch alle in La Florida verzehrten Früchte sowie Weizen, Eicheln und Hickorynüsse entstammen einer Kategorie Pflanzen mit anderem Photosyntheseweg.

Die Guale und andere Küstenbewohner der Region ernährten sich auch nach dem Eintreffen der Europäer teils noch aus dem Meer, wie Gräten und Austernschalen an archäologischen Fundstätten verraten. Aber in welchem Maße? Hier bot sich für unsere Analysen das Verhältnis der beiden stabilen Stickstoff-Isotope an: N-14 und N-15. Denn am Anfang der Nahrungskette im Meer stehen Pflanzen wie Algen, die ein anderes Verhältnis aufweisen als Landpflanzen. Das prägt sich durch bis zum Ende der Nahrungskette, also bis zum Menschen.

Meine Kollegen und ich fanden tatsächlich markante Verschiebungen dieser ▶



BRITISCHES GEBIET
APALACHE
GUALE
TIMUCUA
Santa Catalina de Guale (St.-Catherines-Insel)
Santa Catalina de Guale de Santa Maria (Amelia-Insel)
St. Augustine
San Luis de Apalachee
San Martin de Timucua
LA FLORIDA

Vom Stützpunkt St. Augustine aus kolonisierten die Spanier die Stammesgebiete der Guale, Apalachee und Timucua in den späteren US-Bundesstaaten Florida und Georgia. Missionsstationen wie diese in San Luis de Apalachee entwickelten sich zu Zentren des sozialen und religiösen Lebens.

„Signaturen“ in den Gebeinen. Das spricht generell für einen enormen Wandel der Ernährung. Vor allem steigerte sich der Maiskonsum nach Ankunft der Franziskaner: bei den Guale auf St. Catherines und auf der Amelia-Insel sowie bei den Apalachee. Selbst die Timucua, die vorher wenig oder gar keinen Mais aßen, stellten augenscheinlich ihre Ernährung darauf um.

Der „Knochenchemie“ zufolge wendete sich das Blatt nicht zum Besten. Zuvor hatten sich die Indianer recht abwechslungsreich ernährt: je nach Region mehr oder weniger von Fischen und Meeresfrüchten sowie von vielen Tieren und Pflanzen des Landes. Fortan aber mussten sie offenbar mit einer einseitigeren Kost vorlieb nehmen, weil die Menschen sich auf den alleinigen Anbau von Mais konzentrierten. Dieses Getreide enthält zum einen viel Zucker, der den Zähnen schadet, zum anderen Phytat, das Eisen bindet und dessen Aufnahme aus dem Darm beeinträchtigt. Wer sich überwiegend von Mais ernährt, ist deshalb anfällig für Blutarmut und andere Folgen des Eisenmangels. Schlimmer noch, eine dermaßen einseitige Ernährung hemmt in jungen Jahren das Wachstum und die Entwicklung, weil sie zu wenig Calcium und Vitamin B_3 liefert. Mais versorgt zudem nicht adäquat mit Proteinbausteinen, denn drei der acht für den Menschen nötigen Aminosäuren – Lysin, Isoleucin und Tryptophan – sind je nach Zuchtlinie nur in Spuren oder überhaupt nicht vorhanden.

Nach all dem verwundert es nicht, dass manche Missions-Indianer mehr und tiefere Löcher in den Zähnen aufwiesen als ihre Vorfahren. Die weichere Konsistenz von Nahrung wie Maisbrei trug wohl das ihre dazu bei, weil dann leichter Zahnbeläge entstehen. Von weicherer Nahrung zeugen auch die geringeren Abnutzungsspuren am Zahnschmelz; unter dem Raster-Elektronenmikroskop sieht man weniger der für harte Naturkost typischen Kratzer und Grübchen.

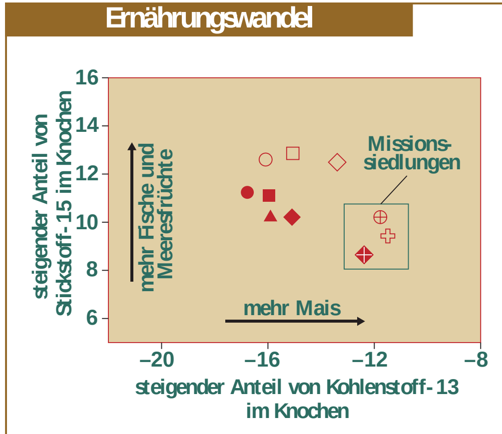
Abweichend von diesem allgemeinen Trend waren in der Missionsstation San Luis die Zähne jedoch weniger kariös als andernorts. Tierische Überreste zeugen davon, dass die Indianer dort als rares Zubrot Rindfleisch und somit proteinreicheres Essen bekamen. Vielleicht verhalf dies auch zu gesünderen Zähnen.

Bakterien, Würmer, Blutarmut

Andere gesundheitliche Probleme schlagen sich bei Jugendlichen ebenfalls in den Zähnen nieder. Wird die Mineralisation gestört, bleiben sichtbare Flecken, Querrillen und weitere auffällige Veränderungen zurück. Wie wir feststellten, waren die Rillen bei manchen Individuen besonders groß, was auf chronische oder vorübergehende schwere Erkrankungen hinweist, ebenso auf Mangelernährung. Mikroskopische Dünnschliffe offenbarten zudem Wachstumsstörungen der Zähne. Gewöhnlich bildet sich im Zahnschmelz eine gleichmäßige Abfolge steiler feiner Linien, die zuerst der schwedische Anatom Anders Adolf Retzius im 19. Jahrhundert beschrieb. Abnorme Streifen fanden wir zwar zu allen Zeiten, aber verstärkt in der Zeit nach Gründung der Missionsstationen (siehe dazu Kasten rechts).

Hygienische Probleme machten den Missions-Indianern ebenfalls zu schaffen. Siedler müssen, wenn sie sich nicht an Bächen, Flüssen oder Seen niederlassen, Brunnen graben. Bei einer archäologischen Untersuchung in Santa Catalina de Guale entdeckten Forscher, dass die Menschen sich aus einem recht flachen, mit Holzplanken eingefassten Wasserloch versorgten. Solche ▶

Ernährungswandel



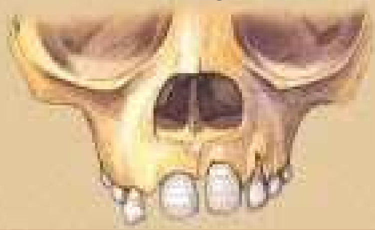
□ Küste Georgias, früh prähistorisch
◇ Küste Georgias, spät prähistorisch
○ Küste Floridas, spät prähistorisch
✙ Küste Georgias, Mission
⊕ Küste Floridas, Mission
◆ Inland Floridas, Mission
■ Inland Georgias, früh prähistorisch
▲ Inland Floridas, früh prähistorisch
◆ Inland Georgias, spät prähistorisch
● Inland Floridas, spät prähistorisch

Der relative Anteil bestimmter Kohlenstoff- beziehungsweise Stickstoff-Isotope in menschlichen Knochen liefert Daten über die Ernährung zu Lebzeiten. Demnach erhöhte sich in den Missionsstationen der Maisanteil an der Ernährung zu Lasten von Meeresfrüchten oder Seefischen.

Was die Knochen verraten

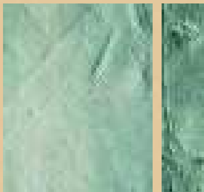
Hypoplasien

Querrillen der Zähne rühren von Krankheiten und Fehlernährung her.



Zahnabnutzung

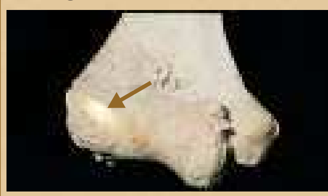
Weiche Kost, etwa Maisbrei, lässt den Zahnschmelz relativ glatt (links), fördert aber Zahnbeläge und damit Karies. Hingegen ist bei Jägern und Sammlern die Zahnoberfläche durch harte Nahrungsbestandteile stärker aufgeraut (rechts).





Arthrose von Gelenken

Fortwährende Überlastung schädigt zunächst die Knorpelmasse; schließlich aber auch den Knochen durch Abrieb (brauner Pfeil). Bewegungen schmerzen immer mehr, die betroffenen Gelenke werden zunehmend funktionsuntüchtig.



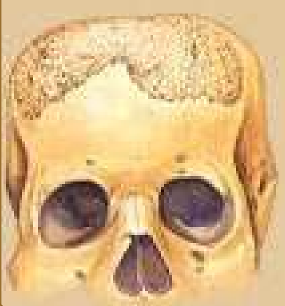
Arthrose der Wirbelsäule

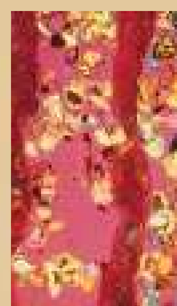
Das Heben und Tragen schwerer Lasten schädigt mit der Zeit die Bandscheiben und Wirbelkörper, vor allem der Lendenwirbelsäule. Lippenartige Auswüchse entstehen. Der Verschleiß verursacht Schmerzen und reduziert die Beweglichkeit.



Anämie und poröse Hyperostose

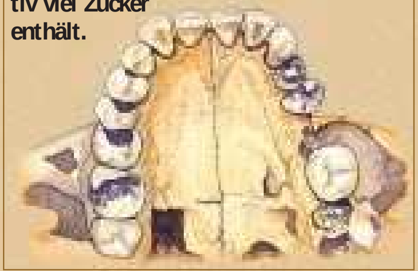
Einseitige Ernährung mit Mais, aber beispielsweise auch massiver Befall mit Hakenwürmern kann zu Anämie führen; Blutarmut manifestiert sich unter anderem in siebartigen Schäden der Schädeldecke. Die unter dem Mikroskop sichtbaren dunklen Bänder (rechts ein gefärbtes Dünnschliffpräparat) sind dann schmaler als bei gesunden Personen.





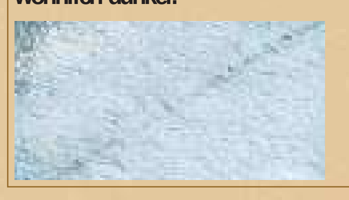
Karies

Einseitige Ernährung insbesondere mit Mais begünstigt die Bildung von Plaques und Karies, auch weil das Getreide relativ viel Zucker enthält.



Gestörte Zahnentwicklung

Mangelernährung und Krankheiten beeinträchtigen die Zahnentwicklung. Die nach dem schwedischen Anatomen Anders Retzius benannten Wachstumslinien im Schmelz sind dann ungewöhnlich dunkel.



Infektionen

Bereits oberflächliche Fleischwunden gefährden das Knochengewebe des Schienbeins, wenn dort Eitererreger eindringen. Sichtbare Schäden an Schien- und Wadenbein fanden sich bei vielen Missions-Indianern.



ROBERTO OSTI (ZEICHNUNG VON SKELETT, KOPF UND ZÄHNEN); MARK TEAFORD (ZAHNSCHMELZ); BARRY STARK (ARTHROSE); MARK C. GRIFFIN (SCHIENBEIN); MICHAEL SCHULTZ (DÜNNSCHLIFFPRÄPARAT); SCOTT W. SIMPSON (ZAHNENTWICKLUNG)

Hintergrund

Die Spanier in La Florida

Juan Ponce de Léon (1460-1521) war Page am Hofe von Aragon, als er die Chance für jene Abenteuer erhielt, die seinen Nachruhm begründeten: Christoph Kolumbus nahm ihn 1493 mit auf seine zweite Reise in die Neue Welt. Jahre später erforschte Ponce de Léon Puerto Rico. Auf das Gerücht hin, auf einem Bahama-Eiland gebe es einen Jungbrunnen, segelte er im Frühling 1513 nach Nordwesten. Gegen Ostern – spanisch: Pascua Florida (Zeit der Blumen) – entdeckte er einen blühenden Küstenstrich, den er denn auch La Florida nannte; allerdings ahnte er nicht, dass er den nordamerikanischen Kontinent erreicht hatte.

Die Halbinsel wurde bald Schauplatz von gewaltsamen Auseinandersetzungen mit den Eingeborenen und von Europäern untereinander. De Léon, mittlerweile in Spanien zum Gouverneur von Florida ernannt und mit dessen weiterer Erkundung beauftragt, starb selbst am Pfeilschuss eines „Wilden“, nachdem er 1521 mit 200 Mann beim heutigen Charlotte Harbor gelandet war. Eine doppelt so starke spanische Truppe, die 1528 in der Bucht von Tampa ankam, war binnen Monaten auf 60 Mann dezimiert. Davon berichten konnten erst 1536 jene letzten vier Überlebenden, die sich unter der Führung des Schatzmeisters Alvar Núñez Cabeza de Vaca bis ins nördliche Mexiko durchgeschlagen hatten, wo marodierende Landsleute sie retteten. 1539 brachte dann Hernando de Soto, der sich bereits in Nicaragua und Peru als umsichtiger Militärführer hervorgetan hatte, ein Expeditionskorps von 1000 Mann und 350 Pferden nach Florida und öffnete den Südosten der nachmaligen USA für die Kolonisation.

Alsbald gründeten Hugenotten die erste Siedlung in La Florida. Das aber missfiel dem eifrigsten Verteidiger des katholischen Glaubens: König Philipp II. entsandte den Konquistador Pedro Menéndez de Avilés, um an der auch strategisch interessanten Atlantikküste das spanische Regime durchzusetzen. Der ließ nahe der kalvinistischen Gemeinde das Fort St. Augustine bauen und am 20. September 1565 alle Protestanten massakrieren; die Leichen wurden in Bäume gehängt samt einer Tafel mit der Inschrift „Nicht weil sie Franzosen, sondern weil sie Häretiker waren“. Spanische Franziskaner nutzten dann St. Augustine als Brückenkopf, um La Florida zu christianisieren.

Genau zwanzig Jahre später kreuzte Englands Seeheld Sir Francis Drake mit 25 Schiffen auf und plünderte St. Augustine; seine Kaperfahrt durch Westindien war so erfolgreich, dass die Bank von Spanien Bankrott ging.

Inge Hoefer

Die Autorin ist Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

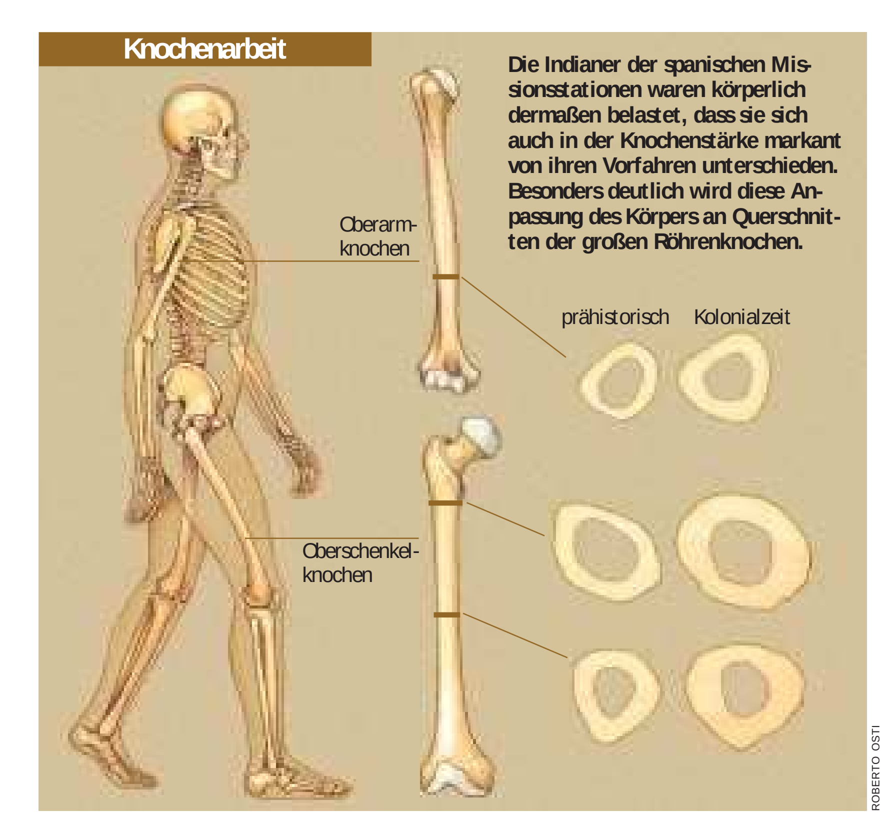
Brunnen werden leicht verseucht und sind in der Region oft Brutstätten von Parasiten und anderen Krankheitserregern.

Der nahe liegende Verdacht einer beständigen Infektionsgefahr erhärtete sich schließlich bei unseren bioarchäologischen Studien: Zahnschmelz, der während der ersten beiden Lebensjahre angelegt wurde, wies die meisten Defekte auf. In dieser Altersstufe sind Kinder besonders anfällig für Durchfälle. Der daraus resultierende starke Flüssigkeitsverlust stört die Funktion aller Zellen, auch von solchen, die den Zahnschmelz bilden. Wie noch heute in vielen Orten in Entwicklungsländern waren damals in den Missionsstationen La Floridas die sanitären Bedingungen sicherlich so schlecht, dass bakterielle und virale Durchfall-Erreger, die ja vor allem über verschmutzte Nahrung und verseuchtes Trinkwasser verbreitet werden, besonders die Gesundheit von Kleinkindern belasteten. Andere ansteckende Krankheiten wie Windpocken und Masern dürften sich dort ebenso leicht ausgebreitet haben, weil die Indianer in beengten Verhältnissen dicht gedrängt um die Station siedelten.

Von gesundheitlichen Problemen zeugen neben den Zähnen auch die Knochen der Menschen. Zwar wirken sich viele akute Infektionen kaum auf das Skelett aus, oder die Betroffenen sterben, bevor es in Mitleidenschaft gezogen ist. Doch können schlimme Entzündungen von Wunden – etwa durch das Bakterium *Staphylococcus aureus* – nachhaltige Spuren hinterlassen. Weil man sich am Unterschenkel leicht verletzt, untersuchten wir Schienbeinknochen aus Gräbern. Tatsächlich entdeckten wir daran oft Veränderungen, wie sie durch eiterndes und absterbendes Gewebe entstehen.

Ferner fanden wir ziemlich viele Schädelknochen, deren Oberfläche nicht dicht und fest, sondern porös ist. Hinter dieser „porösen Hyperostose“ kann Verschiedenes stecken: zum Beispiel Skorbut – also Vitamin-C-Mangel – im frühen Kindesalter, ferner eine ernährungsbedingte Eisenmangel-Anämie oder ein Befall mit Hakenwürmern. Diese Parasiten setzen sich im Darmtrakt fest und können dem Wirt so viel Blut abzapfen, dass ebenfalls eine Eisenmangel-Anämie eintritt. Knochen aus der Zeit vor der Kolonisation waren allerdings noch selten in dieser Weise geschädigt; vermutlich nahmen selbst die Guale, die damals bereits regelmäßig Mais aßen, durch ihren Fisch so viel Eisen auf, dass sie nicht so leicht anämisch,

Knochenarbeit



Die Indianer der spanischen Missionsstationen waren körperlich dermaßen belastet, dass sie sich auch in der Knochenstärke markant von ihren Vorfahren unterschieden. Besonders deutlich wird diese Anpassung des Körpers an Querschnitten der großen Röhrenknochen.

JACQUES LE MOYNE, BREVIS NARRATIO, 1591



Da in La Florida zunächst noch keine Zugtiere zur Verfügung standen, mussten Indianer in den spanischen Missionsstationen alle landwirtschaftlichen Arbeiten verrichten. Diese Darstellung aus dem 16. Jahrhundert zeigt Timucua bei der Anlage eines großen Maisfeldes. Dieser Stamm hat vor der Ankunft der Europäer kaum Mais angebaut.

also blutarm wurden. Dass dann Missions-Indianer so häufig an poröser Hyperostose litten, liegt sehr wahrscheinlich nicht allein an ihrer zunehmend auf Mais ausgerichteten Kost, sondern auch am Befall mit Hakenwürmern.

Folgen der Fron

In ihren schriftlichen Dokumenten über die Eroberung und Missionierung von La Florida berichteten die Spanier unverhohlen, dass sie die einheimische Bevölkerung zu harter Arbeit zwangen. Weil genügend Zugtiere dort erst spät im 17. Jahrhundert zur Verfügung standen, mussten die Indianer schwere Lasten über weite Strecken schleppen. Außerdem hatten sie immer neue Siedlungen anzulegen und zu deren Versorgung große Felder zu bestellen. Insbesondere die Männer wurden zum Bau der Kirchen und Verwaltungsgebäude sowie zu Hilfsdiensten für das Militär herangezogen.

Auf Folgen dieser Fron haben wir gleichfalls unser Untersuchungsmaterial überprüft. So unterliegt das Skelett wie die Muskulatur einem Trainingseffekt, stellt sich also bis zu einem gewissen Grade auf physische Beanspruchung ein. Demnach hätten Indianer von den Missionsstationen stärkere Knochen besitzen sollen als ihre Vorfahren, die nur ihren eigenen Unterhalt bestreiten mussten. Tatsächlich ließen unsere Vergleichsmessungen an Oberarm- und Oberschenkelknochen eine solche Anpassung erkennen. Das Knochenmaterial war dicker und verteilte sich auch anders auf den Querschnitt. Den biomechanischen Berechnungen nach machte dies den Knochen biege- und torsionsfester.

Zugleich waren degenerierte Gelenke bei Skeletten aus der frühen Kolonialzeit weitaus häufiger als bei solchen aus der Phase davor. Derartige Arthrosen, die äußerst schmerzhaft sind und mehr und mehr die Beweglichkeit einschränken, entstehen unter anderem infolge schwerer körperlicher Arbeit. Vielen Indianern wurden bekanntlich Leistungen abverlangt, die ihren Körper überforderten – selbst dann noch, wenn sie bereits krank und ausgemergelt waren.

Die historischen Aufzeichnungen schildern die Erschließung La Floridas lediglich aus Sicht der Spanier. Unsere bioarchäologischen Erkennntnisse vermitteln nicht nur ein umfassenderes, detailreicheres Bild von der Situation der Urbevölkerung, sondern geben auch einen Eindruck von den Schicksalen namenloser Individuen: Seuchen und andere Erkrankungen, unzureichende Ernährung und schwere Arbeit forderten einen hohen Tribut. Die weitere Geschichte der Indianer von La Florida verlief danach kaum besser: Kurz nachdem ihr Land im Jahre 1845 der 27. Bundesstaat der USA geworden war, lebten dort kaum mehr welche. ■

Literaturhinweise

Skeletons in our Closet: Revealing Our Past Through Bioarchaeology. Von Clark Spencer Larsen, Princeton University Press, 2000.

Regional Variation in the Pattern of Maize Adaption and Use in Florida and Georgia. Von Dale L. Hutchinson et al. in: American Antiquity, Bd. 63, Nr. 3, S. 397, Juli 1998.

In the Wake of Conflict: Biological Responses to Conquest. Von Clark Spencer Larsen und George R. Milner (Hg.), Wiley-Liss, 1994.

Weblinks zum Thema finden Sie unter ***www.spektrum.de***

Clark Spencer Larsen, *Präsident der American Association of Physical Anthropologists, leitet das La Florida Bioarchaeology Project, an dem zahlreiche Wissenschaftler aus aller Welt beteiligt sind. Bereits seit seinem Grundstudium beschäftigt er sich mit prähistorischen und frühneuzeitlichen menschlichen Skeletten. Promoviert hat er 1980 in biologischer Anthropologie an der Universität von Michigan. Er lehrt an der Universität von North Carolina in Chapel Hill und ist als Forscher mit dem Amerikanischen Museum für Naturgeschichte assoziiert.*

Al-Biruni

Ein Gelehrter, den das Abendland übersah

In der Blütezeit der Wissenschaft im mittelalterlichen Orient gelangte der Universalgelehrte al-Biruni zu Erkenntnissen, die vergleichbaren Entwicklungen im Abendland um Jahrhunderte vorangingen.



UWE REICHERT

Al-Biruni (links in der Kartusche der arabische Schriftzug seines Namens) war der bedeutendste Gelehrte des Orients.

Von Gotthard Strohmaier

Hätte es vor tausend Jahren schon einen Nobelpreis gegeben, wäre er wohl reihenweise an muslimische Wissenschaftler gegangen. Zu der Zeit wirkte in Europa noch immer das Erbe der Römer nach, zu deren Interessen die anspruchsvollen Wissenschaften nicht gehörten. Im Orient hingegen hatte sich unter dem Islam ein geistiges Klima herausgebildet, das die Beschäftigung mit Naturerscheinungen, der Mathematik und der Medizin nicht nur gestattete, sondern zum Teil sogar intensiv förderte.

Der Einflussbereich der von Mohammed begründeten Religion erstreckte sich im 10. Jahrhundert von der iberischen Halbinsel über Nordafrika und Vorderasien bis zur indischen Grenze. Islamische Gelehrte nahmen das Wissen aus den bekehrten Kulturräumen bereitwillig auf. Das griechisch-hellenistische Erbe wurde ebenso rezipiert wie das Wissen der Inder und die Kenntnisse der Iraner aus der vorislamischen Zeit. Durch den Sieg über die Chinesen in der Schlacht bei Samarkand im Jahre 751 erwarben die Araber von Kriegsgefangenen die Kenntnis der Papierherstellung, und der billige Beschreibstoff wurde zusammen mit ihrer eleganten Schrift, die eine viel höhere Schreibgeschwindigkeit erlaubt als die lateinische, zu einem wichtigen Kulturfaktor.

Mehrere Orte im islamisch-arabischen Raum entwickelten sich zu geistigen und kulturellen Zentren. In Bagdad beispielsweise wurde im 9. und 10. Jahrhundert praktisch alles, was in der griechischen Spätantike an Wissenschaften noch lebendig war, ins Arabische übertragen. Dazu gehörten vor allem das Korpus der aristotelischen Schriften, das umfangreiche Lebenswerk des Arztes Galen von Pergamon (129–216) und der „Almagest“, das astronomische Handbuch des Ptolemäus (um 100–160).



MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHER SALON, STAATLICHE KUNSTSAMMLUNGEN DRESDEN

Die Sternbilder der Antike stellten arabische Astronomen nach hellenistischem Vorbild auf Himmelsgloben dar. Dieses Exemplar stammt aus dem Jahre 1279.

Die islamisch-arabische Wissenschaft erschöpfte sich indes nicht in der Übernahme bereits vorhandenen Wissens. Vielmehr fügte sie existierende Bausteine zusammen und entwickelte sie durch eigene Arbeiten deutlich weiter. Auf diese Weise brachten die Länder der muslimischen Gemeinschaft zahlreiche Gelehrte hervor, die wesentlich zum wissenschaftlichen Fortschritt beitrugen.

Einer der preiswürdigen Kandidaten war der in Ägypten wirkende Naturforscher Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham (um 965–1039), der im Abendland als Alhazen bekannt wurde. Er beschrieb die Wirkungsweise von optischen Linsen und entwickelte Hohlspiegel. Mit seinen optischen Versuchen – 600 Jahre vor Galilei und Kepler – ist er als der erste wirkliche Experimentalphysiker in der Geschichte anzusehen. Ein weiterer Kandidat war der Perser Abu Ali al-Husain ibn Abdallah ibn al-Hasan ibn Ali ibn Sina (um 980–1037). Er schuf Zusammenfassungen der aristotelischen Philosophie und der galenischen Medizin, die jahrhundertelang als Lehrbücher benutzt wurden. Unter seinem latinisierten Namen Avicenna beeinflusste er mit diesen Werken die abendländische Geistes- und Medizingeschichte wie kaum ein anderer nicht-christlicher Gelehrter.

Der Wissenschaftshistoriker George Sarton hat indes einem anderen Zeitgenossen von Alhazen und Avicenna den ersten Rang zuerkannt: dem Gelehrten Abu r-Raihan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973–1048). Im Gegensatz zu den beiden Erstgenannten ist al-Biruni dem Abendland völlig unbekannt geblieben. Erst der französische Orientalist Joseph Reinaud und der deutsche Naturforscher Alexander von Humboldt verbreiteten Mitte des 19. Jahrhunderts die Kunde von ihm in Europa. Bis heute gibt es keine vollständige deutsche oder englische Ausgabe seiner Werke. Es liegt lediglich eine russische Übersetzung der arabischen Schriften vor, die seit 1957 in Taschkent, der mittelasiatischen Heimat des Gelehrten, herausgegeben wird.

Al-Biruni wurde im September 973 in Kath geboren, der am Ufer des Amudarja südlich des Aralsees gelegenen Hauptstadt des damaligen Reiches Choresm. Heute gehört diese Region zu Usbekistan. Sein Schicksal führte ihn – teils freiwillig, teils gezwungen – an verschiedene Orte des mittelasiatischen Raumes. Allen widrigen Umständen zum Trotz ▶

entwickelte sich al-Biruni zum wohl bedeutendsten Gelehrten des islamischen Mittelalters. Wesentliche Beiträge leistete er zur Mathematik, Astronomie, Geodäsie, Mineralogie und Pharmazie. Seine Schriften sind von einer rationalen Denkweise und humanistischen Einstellung geprägt, wie sie nur ein großer Forschergeist entwickeln kann. Die vielseitige Leistung, die er seinem Leben abgerungen hat, sucht ihresgleichen.

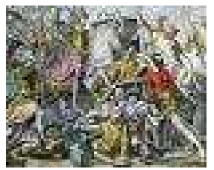
Al-Biruni stammte offenbar aus einfachen Verhältnissen. Aus nicht überlieferten Gründen wuchs er mit den Prinzen der in Choresm regierenden Iraqiden-Dynastie auf. Ein Angehöriger dieses Fürstenhauses, Abu Nasr Mansur ibn Ali ibn Iraq, hatte sich seiner angenommen. Dies erwies sich für den jungen al-Biruni als Glücksfall. Nur in der Nähe eines der Fürstenhöfe, die wegen der politischen Zersplitterung des Kalifats recht zahlreich geworden waren, konnten sich dank der dort gebotenen Muße und der materiellen Sicherheit kreative Begabungen entfalten. Und Abu Nasr Mansur war selbst ein angesehener Gelehrter: Er hatte eine Bearbeitung der „Sphärik“ des hellenistischen Mathematikers Menelaos von Alexandrien herausgegeben, die nur in dieser Form erhalten ist.

Bereits im Alter von etwa 17 Jahren bestimmte al-Biruni selbstständig die geographische Breite seiner Geburtsstadt. Dass die Erde eine Kugel ist, war für ihn selbstverständlich. Ein halbes Jahrtausend vor Martin Behaim, der 1492 in Nürnberg seinen „Erdapfel“ konstruierte, baute al-Biruni einen Erdglobus. Mit fünf Metern Durchmesser war er zehnmal größer angelegt als der Globus des Deutschen, als Halbkugel umfasste er aber nur die nördliche Hemisphäre. Dies hatte gewiss technische Gründe, doch über die Länder jenseits des Äquators war ohnehin kaum etwas bekannt. Auf der sphärischen Oberfläche trug al-Biruni die Positionen von Städten ein, die teils mit astronomischen Verfahren bestimmt und teils aus Entfernungsangaben abgeleitet worden waren, die er von Reisenden erfragt hatte.

Pionier der Erdvermessung

Für die Positionsbestimmung hatte al-Biruni mit denselben Problemen zu kämpfen, die europäische Seefahrer auch noch Jahrhunderte später plagten: Während sich die geographische Breite eines Ortes leicht aus der Sonnenhöhe ermitteln lässt, braucht man für die geographische Länge, also den Winkelabstand zu einem willkürlich festgelegten Nullmeridian, ein raumübergreifendes Zeitsignal. Schon die Griechen hatten erkannt, dass sich dafür eine Mondfinsternis eignet, die von allen Orten aus, an denen der Mond über dem Horizont steht, gleichzeitig gesehen wird. Die tatsächliche Messung erfordert indessen eine weiträumige und vorausschauende Planung. Deshalb korrespondierte al-Biruni mit dem Astronomen Abu l-Wafa al-Buzdjani, der in Bagdad lebte, und vereinbarte mit ihm die gemeinsame Messung der jeweiligen Ortszeit, zu der die für den 24. Mai 997 erwartete Finsternis eintrat. Für die Differenz der Ortszeiten von Kath und Bagdad fanden die beiden Forscher genau eine Stunde – nur fünf Minuten weniger als der wirkliche Wert – und damit den vierundzwanzigsten Teil des Vollkreises, also fünfzehn Grad.

Ein anderes wissenschaftliches Problem betraf die tatsächliche Größe der Erde. Über ihre Kugelform gab es für diejenigen, die Aristoteles und Ptolemäus studiert hatten, keine Diskussionen mehr. Al-Biruni erzählt belustigt von einem Streit, der sich Anfang des 10. Jahrhunderts zwischen einem christlichen Philosophen und einem muslimischen Theologen zugetragen hatte. Letzterer hatte voller Zorn aus einer Aristoteles-Übersetzung Seiten herausgerissen, wo davon die Rede war, dass das Wasser des Ozeans die schwerere Erde und den Weltmittelpunkt ballförmig umgibt. Der Theologe beharrte darauf, dass das flüssige Wasser immer nur die Form eines umgebenden festen Körpers annehme – folglich müsse es von der Erde herabtropfen, falls diese kugelförmig sei. Al-Biruni bemerkt dazu: „Wenn ich an [des Philosophen] Stelle gewesen wäre, hätte ich ihm ins Ohr geschrien und ihm in den Daumen gebissen, damit er nach diesem Anfall wieder zu sich gekommen wäre. Aber das Gespräch mit ihnen ist nutzlos, ja es ist Zeitverschwendung.“



In der Schlacht von Tours und Poitiers verteidigt Karl Martell das Frankenreich gegen die vordringenden Araber

Die Araber fallen in Spanien ein

Schlacht bei Samarkand; Araber besiegen die Chinesen und erlernen die Technik der Papierherstellung



Normannen überfallen das englische Kloster Lindisfarne: Beginn der Wikingerzeit

arabische Übersetzung des „Almagest“ von Ptolemäus; arabische Gradmessung in Mesopotamien

indische, arabische Ziffern

Die schiitischen, iranischen Bujiden bemächtigen sich Bagdads; die Kalifen sinken zu politischer Bedeutungslosigkeit

Blütezeit von Wissenschaft und Kunst im Islam beginnt

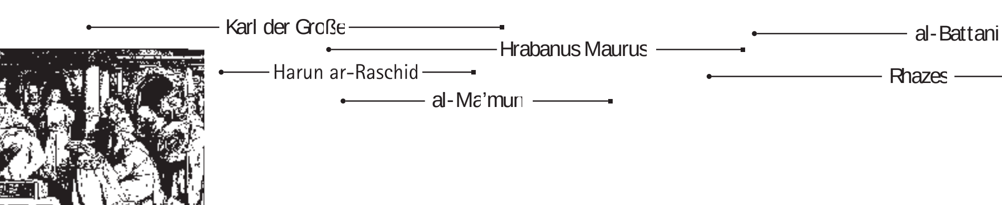
Araber übernehmen indische Ziffern einschließlich der Null

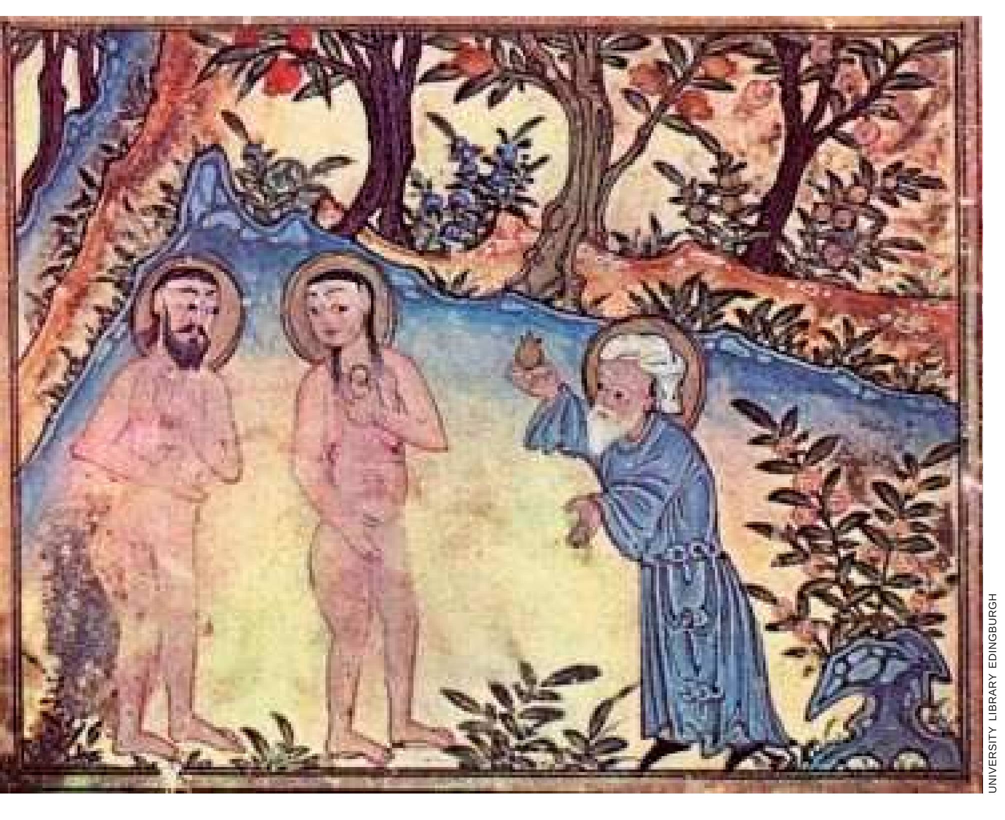
Córdoba beherbergt eine Bibliothek mit 400 000 Bänden

700

800

900





In der „Chronologie der Alten Völker“ erwähnt al-Biruni auch die biblische Urgeschichte. Diese Illustration in einer Abschrift aus dem Jahre 1307 zeigt Adam und Eva mit dem Teufel, den der Koran nicht als Schlange, sondern in Menschengestalt darstellt.

Dabei hatte schon hundert Jahre vor diesem Disput al-Ma'mun (786–833), ein Sohn und Nachfolger des Märchenkalifen Harun ar-Raschid, in der Wüstenebene bei Mossul die Länge eines Breitengrades vermessen lassen. Er benutzte dazu eine von Eratosthenes (276–196 v. Chr.) beschriebene Methode. Das Ergebnis war mit 113 Kilometern erstaunlich genau – nur etwa 1,5 Prozent größer als der moderne Wert. Al-Biruni hat das aufwändige Verfahren beschrieben, doch eine Wiederholung der Messung war ihm versagt, denn er hätte dazu viele Mitarbeiter und in den damals unsicheren Zeiten noch eine militärische Bedeckung gebraucht. Statt dessen wählte er ein anderes Verfahren, das al-Ma'mun auch schon ausprobiert hatte und für das es kein griechisches Vorbild gab.

Der Kalif hatte während eines Kriegszuges an der kleinasiatischen Küste befohlen, die Höhe eines Berges zu vermessen, um dann von dessen Gipfel beim Sonnenuntergang einen Visierstab gegen den Meereshorizont zu richten. Aus der gemessenen Winkeldifferenz zur Waagrechten und der bekannten Höhe des Berges konnte die Größe der Erdkugel berechnet werden. Al-Biruni hatte zwar keine Meeresküste zur Verfügung, aber in seinen späteren Jahren konnte er die weitläufige Indusebene als gleichwertigen Ersatz nutzen. Um das Jahr 1023 befand er sich in der Festung Nandana, die am Rand des afghanischen Gebirges über der indischen Ebene des Pandschab aufragt. Von einem benachbarten Berg konnte er die Horizontlinie der glatten Ebene gegen das Blau des Himmels gut erkennen. Auf diese Weise ermittelte er für den 360. Teil des Erdumfangs einen Wert von 110 275 Metern.

Die frühe Beschäftigung al-Birunis mit der Geodäsie und der sphärischen Trigonometrie ist auf seinen Lehrer Abu Nasr Mansur zurückzuführen. Diese Disziplinen hatten im islamischen Raum einen besonderen Stellenwert, denn in der zweiten Sure des Korans war dem Gläubigen eine bestimmte Aufstellung beim Gebet befohlen: „Und wo du auch immer herausgetreten bist, so wende dein Gesicht in Richtung auf die heilige Moschee, und wo ihr auch immer seid, so wendet euer Gesicht in diese Richtung.“ Al-Biruni machte sich über die Einfältigen lustig, die zwar in der unmittelbaren Umgebung von Mekka noch wüssten, wo die Kaaba gelegen sei, sich aber dann bei größerer Entfernung an Windrichtungen oder am Mittagsstand der Sonne orientierten, weil sie in Mekka zur Som- ▶

Wilhelm der Eroberer besiegt König Harold in der Schlacht von Hastings



Alfons VI. von Kastilien erobert Toledo von den Arabern zurück

1. Kreuzzug

2. Kreuzzug

In Salerno nimmt die Medizin dank des Kontaktes mit den Arabern im nahen Sizilien einen großen Aufschwung

arabische Schriften werden ins Lateinische übersetzt; medizinische Schulen in Montpellier, Bologna, Padua und Paris entstehen

1000 — 1100 — 1200

al-Buzdjani

al-Biruni

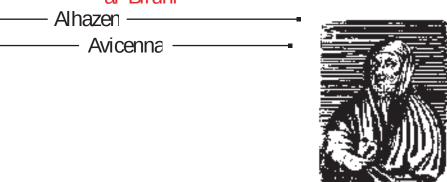
Alhazen

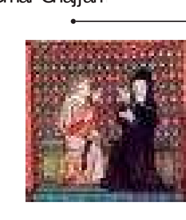
Avicenna

Omar Chajjam

Peter Abaelard

Hildegard von Bingen









ARCHIV GOTTHARD STROHMAIER

Die Reste des Sextanten von Ulug Begs Observatorium bei Samarkand aus dem Jahre 1428. Es ist die vergrößerte Ausgabe eines Instruments, das mehr als 400 Jahre zuvor der Astronom al-Khudjandi in der Nähe der persischen Stadt Rayy errichtete.

merszeit im Zenit stehe und es ihrer Meinung nach auf der ganzen Erde zur gleichen Zeit Mittag sei.

Wie stark ein Forscher von der Gunst eines Landesherren abhängt, bekam al-Biruni im Laufe seines Lebens immer wieder eindringlich vorgeführt. Als im Jahre 995 die Dynastie der Iraqiden in Choresm gestürzt wurde, sah er sich seiner Lebensbasis beraubt, und er musste seine Heimat verlassen. Zuflucht fand er in der persischen Stadt Rayy in der Nähe des heutigen Teheran. Er machte sich dort mit dem Astronomen al-Khudjandi bekannt, der mit seinem Fürsten so gut stand, dass er einen riesigen Sextanten bauen konnte – mit einem Radius von zwanzig Metern. Das gigantische Messgerät war entlang der Meridianlinie ausgerichtet und halb in die Erde eingetieft. Damit ermittelte al-Khudjandi die Schiefe der Ekliptik, wobei er mit 23°32'19'' dem heute gültigen Wert von etwa 23°27' näher kam als Ptolemäus, der 23°52' bestimmt hatte. Der arabische Wissenschaftler hatte erfolgreich den Umstand genutzt, dass sich durch Vergrößern der Instrumente die Messgenauigkeit erhöhen lässt. Dieses Prinzip trieb 400 Jahre später der Herrscher und Astronom Ulug Beg zur Vollendung: Der riesige Sextant, den er in seinem Observatorium bei Samarkand errichtete, war ein um das Doppelte vergrößerter Nachbau der Anlage al-Khudjandis.

Disput mit Avicenna

In Rayy gelang es al-Biruni jedoch nicht, eine Anstellung bei Hofe zu bekommen. Deshalb entschloss er sich bald, ins heimatliche Kath zurückzukehren. Zu seinem Entschluss mag auch sein Vorhaben beigetragen haben, die Mondfinsternis vom Mai 997 zur Längenbestimmung zu nutzen. Denn von Kath aus hatte er eine viel längere Basislinie zu seinem Kollegen al-Buzdjani in Bagdad zur Verfügung als von Rayy aus.

Bereits 998 verließ al-Biruni seine Heimat aufs Neue. Er wandte sich nach Gurgan an der Südostküste des Kaspischen Meeres, wo er am Hofe des Herrschers Qabus wohlwollend aufgenommen wurde. Hier verfasste er einige astronomische Schriften, darunter eine Abhandlung zur Konstruktion des Astrolabs. Mit einem solchen Instrument konnte man Gestirne anvisieren, die Uhrzeit bestimmen sowie geodätische Messungen und trigonometrische Berechnungen durchführen (Bild auf Seite 80).

Etwa fünf Jahre verbrachte al-Biruni in Gurgan. Dann zog es ihn nach Gurgentsch, der neuen Hauptstadt des choresmischen Reiches. Dort hatten sich einige gelehrte Männer zu einer Art Akademie zusammengefunden, darunter auch sein Lehrer Abu Nasr Mansur. Später gesellte sich noch Avicenna hinzu, der wegen veränderter Herrschaftsverhältnisse aus seiner Heimatstadt Buchara fliehen musste.

An seinem neuen Aufenthaltsort befasste sich al-Biruni verstärkt mit physikalischen Problemen. Um die Dichte von Metallen und Edelsteinen messen zu können, konstruierte er ein Überlaufgefäß, aus dem ein Körper mit einem bestimmten Gewicht eine bestimmte Menge Wasser verdrängte; ein gleich schwerer mit einer geringeren oder größeren Dichte brachte hingegen entsprechend mehr oder weniger Wasser zum Überlaufen. Mit diesem Verfahren hätten die Alchemisten, die auch in der islamischen Welt ihr Unwesen trieben, das falsche Gold ihrer Laboratorien überprüfen können, was sie aber offenbar nie taten. Al-Biruni bewahrte sich dazu eine gesunde Skepsis und urteilte nur im Blick auf seine Zeitgenossen, „dass viele verständige Leute in die Alchemie vernarrt sind, während viele Dummköpfe über sie und ihre Adepten spotten“. In der Tat war ihr Tun rationaler als das der Magier, denn sie kamen ohne Beschwörungen aus. Unter den Alchemisten regte sich bereits ein faustischer Wille zur Weltveränderung, welcher der rein betrachtenden antiken Naturphilosophie noch fehlte.

Deren vornehmster Vertreter war Aristoteles. Aber al-Biruni war nicht mit allen Ausführungen in den Schriften des griechischen Denkers zufrieden. So wandte er sich bereits in der Zeit seines zweiten Aufenthalts in seiner Heimatstadt Kath mit einigen Fragen an Avicenna, der damals noch in Buchara lebte und der trotz seiner Jugend bereits als Experte der aristotelischen Philosophie galt.

Der Briefwechsel zwischen al-Biruni und Avicenna griff eine Fülle von Naturphänomenen auf. Aristoteles hatte vier irdische Grundstoffe angenommen: Erde, Wasser, Luft und Feuer. Aus ihrer Verbindung sollte die Vielfalt der Körper hervorgehen. Zugleich hatte er angenommen, dass sie sich unter bestimmten Um-

ständen ineinander umwandeln – etwa entsprechend den verschiedenen Aggregatzuständen. Al-Biruni fragte nun Avicenna, ob sich Wasser beim Verdampfen nur in der Luft verteile und unsichtbar werde oder selbst zu Luft werde. Der Angesprochene hielt allein Letzteres für richtig und führte zum Beweis eigene Experimente an. Dazu legte er mit Wasser gefüllte Flaschen in einen Ofen, worauf diese zerplatzten. Nach Avicennas Interpretation hatte das Wasser in der Hitze die neue Form der Luft angenommen, die mehr Platz brauche. Eine Verteilung der Wasserteilchen hätte ihm zufolge eine solche Sprengkraft nicht entwickeln können. Erst später hat al-Biruni selbst beobachtet, dass sich Quecksilberdampf beim Abkühlen wieder in richtiges Quecksilber zurückverwandelte, also diese Form nie abgelegt hatte.

Al-Biruni fragte auch, warum wassergefüllte Flaschen beim Gefrieren zerplatzen, da sich doch alle Körper in der Kälte zusammenziehen. Avicenna belehrte ihn, dass sich das Wasser tatsächlich zusammenziehe, aber da es nach Aristoteles kein Vakuum gebe, entstehe in dem Gefäß ein Unterdruck, der seine Wand zerspringen lasse. Al-Biruni hatte aber genauer beobachtet und bemerkt, dass die Wandung nicht nach innen, sondern nach außen gedrückt wird.

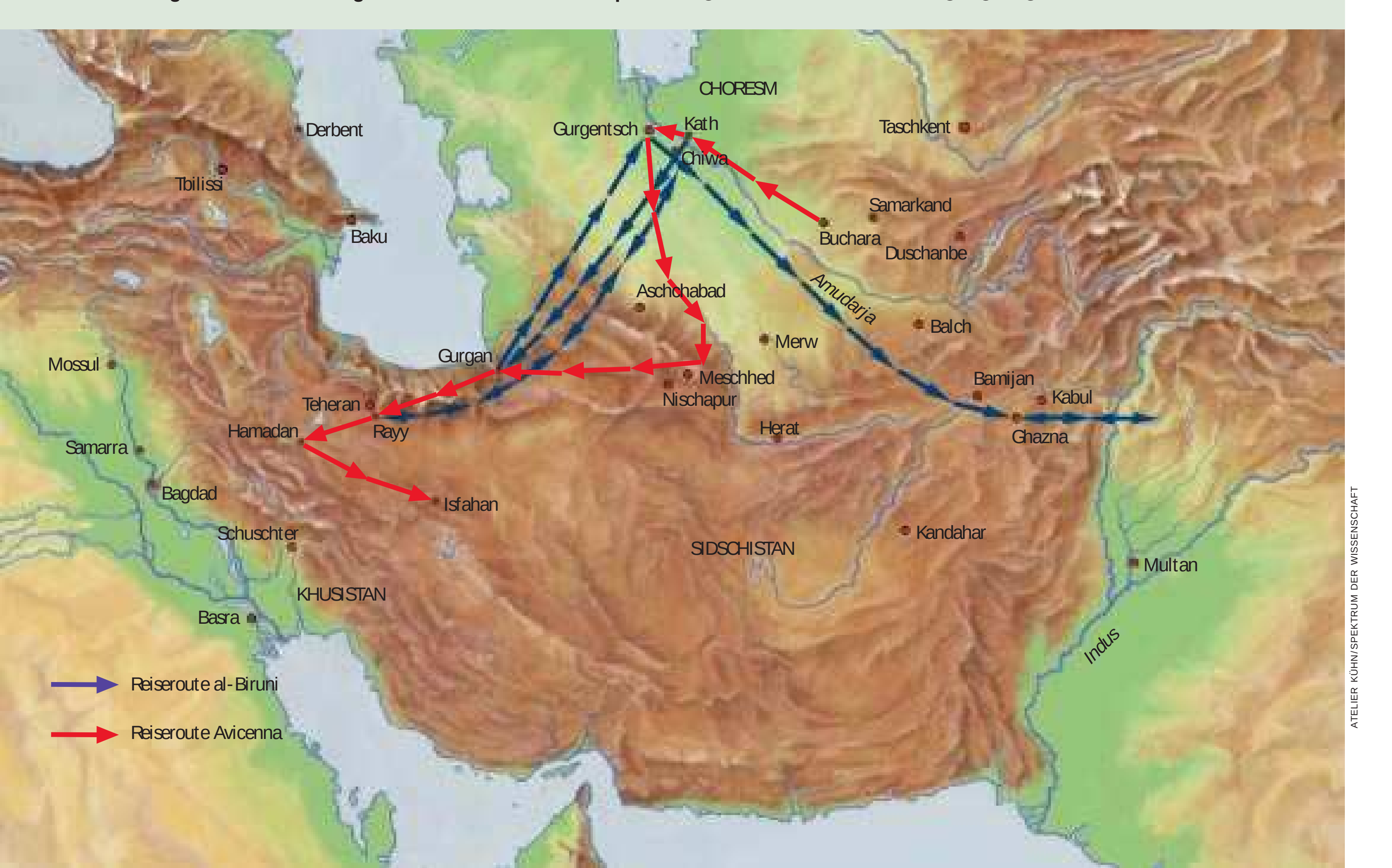
Vordenker eines neuen Weltbildes

In diesen Beispielen offenbart sich ein grundlegender Unterschied zwischen den beiden islamischen Gelehrten: Für Avicenna, der sich stark an die Denkweise der Antike anlehnte, diente das gelegentliche Experiment dazu, eine vorgefasste Theorie zu bestätigen. Al-Biruni hingegen zeigte erste Ansätze, aus dem Gehäuse des aristotelisch-ptolemäischen Weltbildes auszubrechen. Seine Experimente gingen bereits in die Richtung, die man heute als Falsifikation bezeichnen würde. Während Avicenna später in seinem „Kanon in der Medizin" eine allgemein behauptete Giftigkeit des Diamanten theoretisch zu untermauern suchte, berichtete al-Biruni in seiner „Mineralogie": „Einmal wurden in meiner Gegenwart einem Hund Diamanten eingegeben, es zeigte sich keine Wirkung, weder sofort noch nach einiger Zeit."

In den Jahren 1013/1014 begannen in Choresm politische Unruhen, die nicht nur für den weiteren Lebensweg al-Birunis und Avicennas einschneidende Bedeutung hatten, sondern auch großen Einfluss auf den Verlauf der Wissenschafts- und Kulturgeschichte nehmen sollten. Von seiner Residenzstadt Ghazna aus betrieb der Sultan Mahmud eine rastlose Eroberungspolitik. Sein Herrschaftsbereich erstreckte sich von Georgien im Westen bis in das Industal im Osten. Im Norden hatte er Choresm zunächst durch friedliche Weise an sich gebunden, indem er dem dortigen Schah eine seiner Schwestern zur Frau gegeben hatte. Als sich der Adel in Choresm gegen die Willkür Mahmuds auflehnte und ▶

DIE LEBENSSTATIONEN VON AL-BIRUNI UND AVICENNA

Seine Geburtsstadt Kath mußte al-Biruni 995 verlassen, als der Emir von Gurgentsch (dem heutigen Kunja Urgentsch in Turkmenistan) die Stadt überfiel und den dortigen Herrscher hinrichten ließ. Al-Biruni floh in das persische Rayy nahe Teheran, kehrte jedoch zwei Jahre später in seine Heimatstadt zurück, um mit Hilfe einer Mondfinsternis die Entfernung Kath–Bagdad zu bestimmen. Auf der Suche nach einem Förderer fand er schließlich die Unterstützung eines Fürsten in Gurgan an der Südostküste des Kaspischen Meeres. Im Jahre 1004 siedelte er nach Gurgentsch über, wo sich gelehrte Männer – darunter der aus Buchara stammende Avicenna – zu einer kleinen Akademie zusammenfanden. Nach politischen Unruhen fiel der von Ghazna aus über weite Teile Vorderasiens herrschende Despot Mahmud 1017 mit einem Heer in Choresm ein und verschleppte zahlreiche Gefangene – darunter al-Biruni – nach Afghanistan. Avicenna indes war rechtzeitig die Flucht gelungen; auf abenteuerlichen Wegen gelangte er bis nach Isfahan.



ATELIER KÜHN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

den Schah ermordete, war dies willkommener Anlass für Mahmud, mit seinem Heer in das kleine Staatswesen einzufallen und seinen Schwager zu rächen. Al-Biruni, der zu einem engen Vertrauten des Schahs aufgestiegen war, entging zwar der Hinrichtung, wurde aber mit zahllosen Gefangenen nach Ghazna verschleppt. Avicenna war rechtzeitig aus Gurgentsch geflohen; auf abenteuerlichen Wegen gelangte er über Gurgan und Rayy nach Isfahan.

Al-Biruni gelang es, sich mit seinem neuen Schicksal zu arrangieren. Denn auch für einen ungeistigen Machtmenschen wie Mahmud war die Gegenwart eines Gelehrten am Hofe nicht ganz unnütz. Einmal erschien in Ghazna ein Gesandter der Bulgaren aus dem Wolgagebiet zur Audienz. Beiläufig erzählte dieser, im hohen Norden gäbe es Gegenden, in denen im Sommer die Sonne nicht untergehe. Mahmud brauste auf und beschuldigte ihn der Ketzerei, war doch das fünfmalige pflichtgemäße Tageszeitengebet und das Fasten im Ramadan am Auf- und Untergang der Sonne orientiert. Al-Biruni war zugegen und konnte begründen, dass es mit dem beschriebenen Phänomen seine Richtigkeit haben müsse. In seiner „Geodäsie" berichtet er, dass Anwohner der Ostsee auf den Ozean hinausfahren „und dabei ihre Fahrt in Richtung auf den Himmelsnordpol bis zu einer Stelle fortsetzen, wo die Sonne bei ihrer sommerlichen Wende über dem Horizont kreist. Sie beobachten das und brüsten sich damit bei ihren Leuten, dass sie den Ort erreicht haben, an dem es keine Nacht gibt".

Wiederholt unternahm Mahmud Kriegszüge nach Nordwestindien. Als muslimischer Glaubenskämpfer plünderte er dort Tempel und brachte Reichtümer, Elefanten und Sklaven nach Ghazna. Al-Biruni durfte oder musste ihn dabei begleiten und nutzte die Gelegenheit zu ausgedehnten Studien, die sogar das Erlernen des Sanskrit einschlossen. Die Frucht dieser Reisen ist eine umfassende Monographie über Indien, in der er alles zu analysieren versuchte, was ihm in dieser völlig fremden Welt auffiel: das Kastenwesen, den Polytheismus, die Seelenwanderung, die seltsamen kultischen Reinheitsvorstellungen und die heiligen Kühe.

Anfangs hatte al-Biruni gehofft, durch den Kontakt mit indischen Astronomen etwas Neues hinzulernen zu können. Darin sah er sich aber getäuscht. Manches entsprach zwar dem, was die Griechen auch und besser ausgearbeitet hatten. Dann aber störten ihn Kompromisse mit der Volksreligion, wenn etwa die Mond- und Sonnenfinsternisse, die im Kult noch heute eine Rolle spielen, auf einen unsichtbaren Dämon am Himmel zurückgeführt wurden. Als Ursache der falschen Meinung entdeckte er, dass die indische Vorstellung den Mond über der Sonne platziert hatte, und darum „brauchten sie etwas, was die beiden Gestirne packt wie ein Fisch ein rundes Brot". Im Großen und Ganzen konnte er die indische Wissenschaft „nur mit Perlmutt vergleichen, das mit Tonscherben vermengt ist, oder mit Perlen im Mist oder mit geschnittenem Bergkristall unter einem Haufen Kieselsteine". Er vermisste die unbedingte Wahrheitsliebe, die einst einen Sokrates ausgezeichnet hatte. Um die indischen Kollegen zu belehren, übersetzte er für sie das mathematische Lehrbuch des Euklid, das astronomische Handbuch des Ptolemäus und etwas über die Herstellung des Astrolabs.

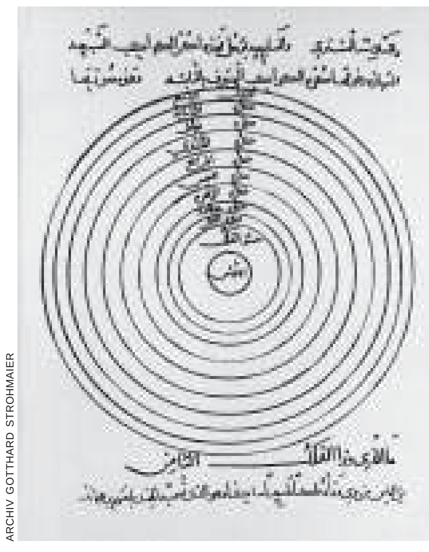
Europa verpasste eine Chance

Beim Lesen des Indienbuches entsteht stellenweise der Eindruck, als spreche ein arroganter britischer Kolonialbeamter – humanistisch gebildet, aber nur mit einer begrenzten Sympathie für die indische Kultur. In der Tat meinte al-Biruni, dass all die Verkehrtheit des indischen Wesens nur durch die Annahme des Islams zu beheben sei, der einst sogar aus den alten Arabern zivilisierte Menschen gemacht habe. So hat al-Biruni mit seinem sezierenden Eindringen in die frem-

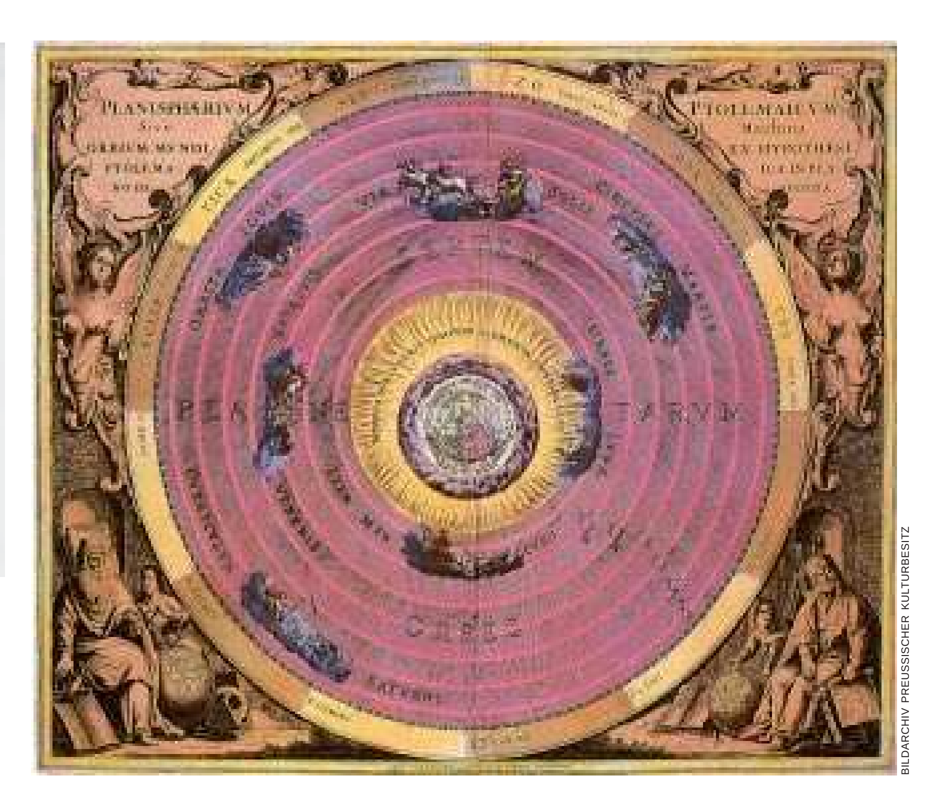


Astrolabien dienten im Mittelalter als universelle Messinstrumente. Diese frühen Vorläufer der drehbaren Sternkarte und des Sextanten wurden in der griechischen Antike erfunden, von islamischen Wissenschaftlern weiterentwickelt und jahrhundertelang von Astronomen und Seefahrern eingesetzt.

BILDARCHIV PREUSSISCHER KULTURBESITZ / BENAKI MUSEUM, ATHEN (INSET)



ARCHIV GOTTHARD STROHMAIER



BILDARCHIV PREUSSISCHER KULTURBESITZ

In seiner „Einführung in die Elemente der Astrologie" zeichnete al-Biruni das ptolemäische Weltmodell mit der Erde in der Mitte und den sie umkreisenden Gestirnsphären (oben); rechts das gleiche Modell in einem Kupferstich von Andreas Cellarius aus dem Jahre 1708.

de Kultur den Raub- und Eroberungszügen eines Mahmud und seiner Nachfolger Hilfestellung geleistet, die einem Teil des Subkontinents tatsächlich eine andere Identität aufgeprägt haben.

Dennoch könnten wir Europäer uns froh schätzen, wenn es in unserem Erdteil um die erste Jahrtausendwende einen al-Biruni gegeben hätte, der Latein gelernt und sich mit dem scharfen Blick des Außenstehenden der Geschichte und der bescheidenen Kultur unserer westeuropäischen Ahnen angenommen hätte.

Die alten Römer, so tüchtig sie in der Verwaltung, der Jurisprudenz und der Architektur auch waren, konnten nur dürftige Reste des antiken Wissens an die bildungseifrigen Mönche und Scholaren des lateinischen Mittelalters weitergeben. Die angeblich seherisch begabte Äbtissin Hildegard von Bingen (1098–1179) beeindruckt den heutigen Leser zwar durch ihren frischen Blick auf den Menschen und die ihn umgebende Natur. Aber was sie in ihren „Causae et curae" über die Phasen des Mondes, der wie ein Holzstoß angezündet wird, und über seine durch ein Unwetter verursachten Finsternisse vortrug, stand doch sehr tief unter dem Niveau der zeitgenössischen muslimischen Wissenschaft.

Das große intellektuelle Gefälle zwischen Morgen- und Abendland konnte natürlich nicht lange ohne Ausgleich bleiben. Langsam begonnen hatte er bereits am Ende des 10. Jahrhunderts in Nordspanien in der Kontaktzone zum maurischen Teil der Halbinsel, und zwar mit der Übernahme des bereits erwähnten Astrolabs und der Übersetzung zugehöriger Gebrauchsanweisungen. Die Begeisterung für diese technische Errungenschaft war so groß, dass der Philosoph Peter Abaelard (1079–1142) seinen Sohn, den er mit seiner Schülerin Heloise in die Welt gesetzt hatte, Astrolabius nannte. Das Instrument, das in vielen Exemplaren nachgebaut wurde, war nur die so genannte planisphärische Variante, die schon die Griechen entwickelt hatten; daneben gab es viele andere, die al-Biruni in einer Schrift vorgeführt hatte.

Eine Konstruktion, die man die „kahnförmige" nannte, verdient besonderes Interesse: Sie war auf der Vorstellung aufgebaut, dass die Erde in der Mitte des Kosmos rotiert und die äußerste Kugelschale, in der die Fixsterne eingelagert schienen, in Wahrheit stillsteht. Das war zwar noch nicht die heliozentrische Revolution des Kopernikus, aber doch ein halber Weg dorthin. Al-Biruni bemerkte hierzu, dass vom rein mathematischen Standpunkt überhaupt keine Einwände gegen diese Vorstellung zu erheben seien; ihr stünden aber physikalische Gründe entgegen, weil die Menschen von der rasend schnellen Bewegung der Erdoberfläche etwas merken müssten. Das Foucaultsche Pendel war damals leider noch nicht erfunden.

Mitte des 12. Jahrhunderts setzte in Spanien eine ausgedehnte Übersetzungstätigkeit ein. In Toledo übertrug Gerhard von Cremona neben vielen anderen arabischen Werken Avicennas „Kanon in der Medizin" sowie den „Almagest" des Ptolemäus. Al-Birunis „Mas'udischer Kanon", eine bessere und modernere systematische Darstellung der Astronomie, lag indes nicht in der Reichweite der Übersetzer. Deshalb erschienen späteren Generationen die muslimischen Wissenschaftler als bloße Vermittler des griechischen Wissens. Erst die neuzeitliche Arabistik hat al-Biruni entdeckt, und ein breiteres Publikum wurde erst dann auf ihn aufmerksam, als die europäische Wissenschaft in allen Punkten weit über ihn hinausgekommen war. ■



Gotthard Strohmaier *ist Mitarbeiter am Corpus Medicorum Graecorum der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und lehrt am Seminar für Semitistik und Arabistik der Freien Universität Berlin.*

Literaturhinweise:

Al-Biruni. In den Gärten der Wissenschaft. Ausgewählte Texte aus den Werken des muslimischen Universalgelehrten, übersetzt und erläutert von G. Strohmaier, 2. verb. Aufl., Leipzig 1991.

Avicenna. Von G. Strohmaier, München 1999.

Al-Biruni. Von E. S. Kennedy in: Dictionary of Scientific Biography, hrsg. v. Ch. C. Gillispie, Bd. 2, New York 1970, S. 147.

Weblinks zum Thema finden Sie unter ***www.spektrum.de***

AUTOMOBILTECHNIK

Zwölf Zylinder und eine Thermosflasche

Die Bayerischen Motorenwerke setzen auf einen Verbrennungsmotor, der Wasserstoff und Benzin gleichermaßen gut verdaut.

Von Thomas Dietsch und Hans-Christian Fickel

Ich glaube, dass eines Tages Wasserstoff und Sauerstoff ... eine unerschöpfliche Quelle von Wärme und Licht bilden werden“, verkündete 1874 der Romanautor Jules Verne. 35 Jahre zuvor hatte der englische Gelehrte Sir William Grove Wasser elektrisch in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten und diese Reaktion dann wieder umgekehrt; gemeinhin wird dies als Geburtsstunde der Brennstoffzelle gesehen. Doch bis in das 20. Jahrhundert hinein blieb der energiereiche Wasserstoff auf Nischenmärkte der chemischen Industrie und der Raumfahrt beschränkt. Zu aufwendig erschien das Handling im Vergleich zu anderen, insbesondere fossilen Brennstoffen.

Angesichts aktueller Prognosen zum Treibhauseffekt ist diese Entwicklung bedauerlich, denn bei der Verbrennung von Wasser- und Sauerstoff entsteht nur Wasser. Zudem enthält ein Kilogramm Wasserstoff dreimal so viel Energie wie die gleiche Menge etwa an Benzin. Und schließlich: Die Ölquellen werden in wenigen Jahrzehnten versiegen. Alle führenden Fahrzeughersteller gehen deshalb davon aus, dass Wasserstoff der Treibstoff des 21. Jahrhunderts sein wird.

Unterschiede gibt es im Konzept: Während die einen ausschließlich auf die Brennstoffzelle in Kombination mit Elektroantrieben setzen, befürworten andere, darunter auch BMW, die direkte, sprich heiße Verbrennung von Wasserstoff. Die Technik dazu ist jetzt marktreif. Prototypen des BMW 750hL werden derzeit in einer weltweiten Kampagne im Praxiseinsatz getestet.

Das Fahrzeug ist eine komfortabel ausgestattete Limousine mit einem Zwölf-Zylinder-Motor, der sie auf 226 Kilometer pro Stunde beschleunigen kann. Sein Hubraum beträgt 5,4 Liter, der Motor liefert 150 Kilowatt bei 5800 Umdrehungen – Daten, wie sie auch für konventionelle Fahrzeuge dieser Klasse gelten. Doch dieses Automobil besitzt zwei Gemischbildungssysteme, nämlich eines für Benzin und eines für Wasserstoff. Ist dessen Verbrennung gerade nicht möglich, schaltet die Steuerelektronik automatisch auf den herkömmlichen Treibstoff um. Mit einer Füllung beider Tanks kommt das Fahrzeug mehr als 1000 Kilometer weit.

Dass derselbe Motor für verschiedene Verbrennungsprozesse geeignet sein soll, mag auf den ersten Blick verblüffen, doch tatsächlich ist das Grundprinzip ja immer gleich: In jedem Zylinder wird ein Gemisch aus Luft-Sauerstoff und einem Treibstoff mittels eines elektrischen Funkens in Brand gesetzt. Da der Wasserstoff dem Motor nur mit geringem Druck zugeführt werden kann, mischt ihn ein spezielles System schon in den Ansaugrohren der einzelnen Zylinder der Verbrennungsluft bei (äußere Gemischbildung). Aufgrund der geringen Dichte des Gases wären handelsübliche Einspritzsysteme allerdings ungeeignet, um die erforderliche Treibstoffmenge exakt zu bemessen. Gemeinsam mit einem Partnerunternehmen entwickelte BMW deshalb neue Dosierventile. Ihnen ist ein elektronischer Druckregler vorgeschaltet, der den optimalen Einblasedruck je nach Betriebszustand des Motors anhand eines Kennfeldes einstellt.

Elektronik sorgt auch für Sicherheit und Zuverlässigkeit. Die zwölf Zylinder sind in zwei Bänken angeordnet, die jeweils von einer unabhängigen Steuerung beaufsichtigt werden; jede Bank verfügt auch über eine eigene Brennstoffversorgung und Gemischbildung. Alle Steuergeräte sind miteinander vernetzt, um relevante Parameter unablässig abzugleichen und bei Unregelmäßigkeiten schnell zu reagieren. Fehlfunktionen, wie zum Beispiel der Ausfall eines Einblaseventils, bewirken so nur das Abschalten der Gaszufuhr und Umschalten



Den Härtetest bestehen die Wasserstofffahrzeuge von BMW in der Wüste von Dubai. Das Land hat Sonne satt, sodass die umweltfreundliche Elektrolyse von Wasser zur Treibstoffgewinnung kein Problem darstellt.



Ein 12-Zylindermotor der besonderen Art: Treten Probleme bei der Wasserstoffzufuhr auf, schaltet eine spezielle Steuerung automatisch auf Benzinbetrieb um.

auf Benzin. Gegebenenfalls kann auch die Einspritzung der betroffenen Bank ganz stillgelegt werden, denn der Motor ist auch mit sechs Zylindern durchaus noch betriebsfähig.

Grundsätzlich besteht bei jeder Verbrennung die Gefahr, dass sich unerwünschte Nebenprodukte bilden. Zwar ist Wasserstoff daran selbst nicht beteiligt, doch Bestandteile der zugeführten Luft vermögen bei den hohen Temperaturen miteinander zu reagieren. So können oberhalb von 1700 Grad Celsius umweltschädigende Stickstoffoxide (NO, NO_2) entstehen. Glücklicherweise ist die „Knallgasreaktion“ von Sauerstoff und Wasserstoff über einen weiten Bereich von Temperaturen und Gemischverhältnissen zündbar. Durch einen hohen Luftüberschuss lässt sich die Verbrennung deshalb elektronisch so steuern, dass eine NOx-Bildung schon im Zylinder weitgehend vermieden wird. Die überschüssige, nicht an der Verbrennung beteiligte Luft nimmt Wärme auf und senkt die Flammentemperatur unter die kritische Grenze. Wichtig für ein optimales Ergebnis ist es, lokale Anreicherungen zu vermeiden, so genannte Ladungsschichtung. Die Gemischbildung wurde anhand von Simulationsrechnungen mit einem 3D-Finite-Elemente-Programm (siehe Bild nächste Seite) optimiert. Damit ließen sich auch „Rückzündungen“ vermeiden, also frühzeitige Zündungen während der Gemischbildungsphase, die einen Leistungsverlust zur Folge haben; Motoren mit äußerer Gemischbildung neigen sonst dazu. Die Verbrennung mit Luftüberschuss hat einen weiteren Vorteil: Der relative Wasserdampfanteil der Abluft entspricht etwa dem des Benzinmotors, sodass keine speziellen Öle mit höherer Wasseraufnahmefähigkeit oder rostfreie Materialien in der Abgasanlage erforderlich sind.

Eisbär im Tank

Zwar konnten viele Komponenten wie Grundmotor, Fahrwerk oder Karosserie für das Hybrid- oder besser Bi-fuel-Fahrzeug übernommen werden, eine wesentliche neue Komponente kam freilich hinzu: ein Tank für verflüssigten Wasserstoff. Eine weitere Möglichkeit, Wasserstoff zu speichern, wäre die Kompression, doch ein hoher Druck im Tank verbietet sich aus Sicherheitsgründen wie auch aus praktischen Erwägungen. Zudem ist die Energiedichte des flüssigen Treibstoffs fünfmal so groß wie die des stark komprimierten Gases und erreicht somit gut drei Kilowattstunden pro Liter (zum Vergleich: bei Benzin und Diesel sind es etwa zehn Kilowattstunden pro Liter). Für die Treibstoffversorgung des Motors reicht, wie erwähnt, der leichte Überdruck des Gaspolsters im Flüssigkeitstank.

Damit der Wasserstoff auch ohne Druck flüssig vorliegt, wird er auf minus 253 Grad Celsius gekühlt; der Tank entspricht vom Aufbau her also einer Art überdimensionaler Thermosflasche. Eine aktive Kühlung ist nicht notwendig, denn bei der Entnahme von Wasserstoff aus dem Gaspolster im Tank senkt sich der Druck etwas. Wenn der flüssige Wasserstoff dabei verdampft, wird der Flüssigkeit Wärme entzogen – das Medium kühlt sich also wieder von ganz alleine ab. Auf diese Weise wird schon seit Jahren Wasserstoff weltweit zu Verbrauchern etwa in der chemischen Industrie befördert. Die Sicherheit der Tanks wurde in umfangreichen Versuchsserien bis hin zu Crash-Tests geprüft. Für den Einsatz im Personenverkehr optimierte unser Unternehmen diese Technik gemeinsam mit Partnern, sodass das Tanken von Wasserstoff einfacher ist als das von Benzin beziehungsweise Diesel. Eine vollautomatische Tankstelle ging 1999 am Flughafen München in Betrieb.

Eventuelle Funktionsstörungen registriert ein übergeordnetes Diagnosesystem. Je nach Art des auftretenden Fehlers leitet es entsprechende Maßnahmen ein: ▶

ALLE BILDER IN DIESEM ARTIKEL: BMW AG



Eine Brennstoffzelle versorgt die Bordelektronik und andere Stromverbraucher – auch wenn der Motor nicht läuft.

Bei Fehlern im Wasserstoff-System des Motors wird auf Benzinbetrieb umgeschaltet. Bei anderen Fehlern, wie zum Beispiel einer Funktionsstörung bei der Treibstoffentnahme, sendet das Diagnosesystem über Funk eine Nachricht zur BMW-Service-Leitzentrale mit detaillierten Informationen.

Registriert ein Crashsensor einen Unfall, erhält die Zentrale der BMW-Werksfeuerwehr eine mittels GPS bestimmte Positionsangabe und kann örtliche Rettungsdienste über die besonderen Eigenschaften eines Wasserstofffahrzeugs unterrichten. Ähnlich wie in der Formel 1 liefert dieses System auch Informationen zum allgemeinen Status des Autos, etwa über einen falschen Reifenfülldruck oder fehlendes Waschwasser. Spätestens beim nächsten Werkstatttermin können diese Fehler dann einfach behoben werden.

Trotz der Kompromisse, die der Zweistoffbetrieb notwendig macht, beträgt die Leistung des Motors bei der Wasserstoffverbrennung über 150 Kilowatt, ein Wert, der mit einem auf Brennstoffzellen beruhenden Elektroantrieb nicht möglich wäre. Das heißt aber nicht, dass diese Technologie nicht auch genutzt würde: Eine Membran-Brennstoffzelle liefert Strom für das Bordnetz (PEM, Polymer-Elektrolyt-Membran). Während konventionelle Batterien von der „Lichtmaschine“ aufgeladen werden, arbeitet dieses System motorunabhängig und wird vom Wasserstofftank gespeist. Auch wenn der Motor nicht läuft, lässt sich so zum Beispiel die Klimaanlage oder Heizung starten.

Die Brennstoffzelle liefert nicht nur dreimal mehr Leistung als eine Lichtmaschine, sie erzeugt auch nur dann Strom, wenn er von den eingeschalteten Verbrauchern angefordert wird, während eine Lichtmaschine permanent mitläuft. Insgesamt ergibt sich so, umgerechnet auf Benzin, eine Treibstoffeinsparung von einem Liter pro 100 Kilometern im Stadtverkehr. Wenn in naher Zukunft auch Wasserpumpe, Ölpumpen, Bremskraftverstärker und dergleichen elektrisch betrieben werden, reduziert das den Verbrauch weiter. Außerdem wird der Motor um mehr als zehn Kilowatt entlastet, die dann als Antriebsleistung zur Verfügung stehen.

Mittels Computersimulation wurde die Gemischbildung optimiert, hier die Wasserstoff-Verteilung beim Öffnen des Einlassventils (λ_{H_2} bezeichnet das Vielfache der für die Verbrennung benötigten Mindestluftmenge).

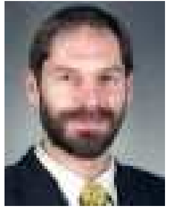
Durch die Wüste

Während der Expo 2000 bewältigten Testfahrzeuge über 100 000 Kilometer. So konnten interessierte Besucher des Expo-Geländes in Hannover an einer Testfahrt teilnehmen. Aber auch in München, wo das Deutsche Museum–Verkehrszentrum in Kooperation mit BMW als weltweites Expo-Projekt eine Wasserstoff-Ausstellung durchführte, war ein „Fahren mit Sonne und Wasser“ möglich. In diesem Jahr starteten weltweite Härtetests in Dubai (Vereinigte Arabische Emirate). Es folgen spezielle Tests in der Innenstadt von Tokio, bevor die Fahrzeuge in Kalifornien eine so genannte Heißland-Erprobung absolvieren.

Das Ziel ist klar definiert: Noch während der Laufzeit des neuen 7ers, der Ende dieses Jahres auf den Markt kommt, erscheint auch eine Wasserstoff-Version. Das Wasserstoff-Tankstellennetz soll so weit ausgebaut werden, dass bis zum Ende des Jahrzehnts mehrere tausend Limousinen dieser Art auf den Straßen fahren. ■

*Der Physiker **Thomas Dietsch** (links) betreute sieben Jahre lang den Bereich Photovoltaik und Brennstoffzellen bei dem Joint-Venture Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH. Seit 1998 leitet er die PEM-Brennstoffzellen-Entwicklung bei der BMW Fahrzeugforschung. **Hans-Christian Fickel** ist Maschinenbauer. Seit 1987 leitet er bei BMW die Entwicklung des Wasserstoff-Verbrennungsmotors.*





MUSIKTECHNIK

Etüde für Chip und Schallfeld-Kontrolle

Digitalpianos imitieren das Klangverhalten von Klavier und Flügel, künftige sogar deren Resonanzböden.

Von Thoralf Abgarjan

Das Hammerklavier gilt weithin als Königin der Musikinstrumente, denn es beherrscht alle Bereiche eines klassischen Orchesters: Beim mehrstimmigen Spiel erklingen Melodien und Harmonien gleichzeitig, der kurze Anschlag der Saiten verleiht dem Klang zudem einen perkussiven Charakter (in der Jazz-Big-Band gehört das Instrument deshalb zur Rhythmusgruppe). So begnadet ein Musiker diese Möglichkeiten auch auszuschöpfen vermag, seine Nachbarn schätzen dies nicht unbedingt, schon gar nicht in den späten Abendstunden. Zudem kostet ein gutes Klavier oder gar ein Flügel einige Tausende und muss regelmäßig von einem Fachmann gestimmt werden.

Deshalb haben Digitalpianos seit ihrer Einführung Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts schnell Marktanteile gewonnen. Mit immer ausgefeilterer Technik in der Tonerzeugung und Tastatur erobern sie die Wohnzimmer – lassen sie sich leise oder mit Kopfhörer spielen. Auch bleibt die Stimmung unverändert.

Um an das akusto-mechanische Vorbild so nahe wie möglich heranzukommen, suchen die Hersteller den Prozess der Klangformung bis ins Detail zu modellieren. Das beginnt bereits beim Anschlagen einer Taste. Die Mechanik eines Klaviers oder Flügels ist, verglichen mit den meisten anderen Musikinstrumenten, sehr aufwendig (siehe Spektrum der Wissenschaft, 12/2000, S. 124). Der Tastendruck löst einen Hammer aus, der bis zu drei Saiten pro Ton anschlägt und in Schwingung versetzt; gleichzeitig wird auch der Filzdämpfer von ihnen abgehoben, sodass sie frei schwingen können. Der über den metallenen Rahmen auf den Resonanzboden des Instruments übertragene Klang umfasst ein weites Spektrum an Frequenzen, insbesondere den Grundton und Vielfache davon, so genannte Partialtöne.

Die Mechanik ist so eingerichtet, dass der Hammer eine Saite nur kurz berührt (0,5 Millisekunden lang in den Höhen, bis zu fünf im Bass-Bereich). Dadurch kann sie – bei abgehobenem Dämpfer – länger ausklingen. Löst der Spieler seinen Finger wieder von der Taste, legt sich der Dämpfer auf die Saiten und stoppt die Schwingung.

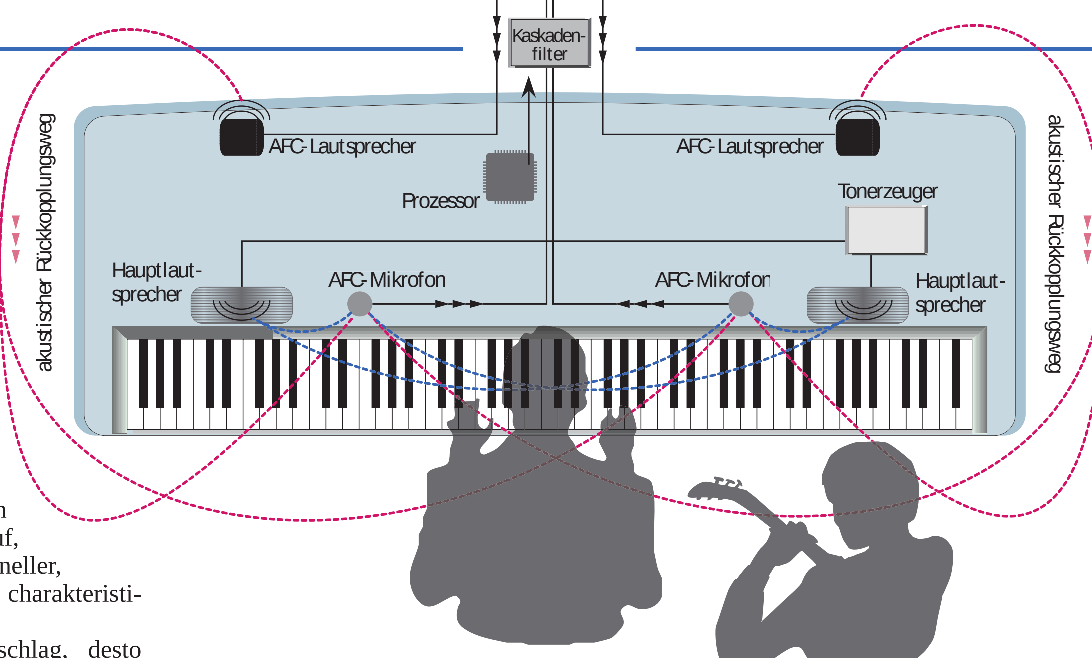
Auch wenn wir davon sprechen, dass ein Instrument Töne spielt, so sind es doch tatsächlich stets Klänge mit einem tonalen Bezug: Die so genannte Grundfrequenz dominiert, es gibt aber zahlreiche Vielfache dieser Schwingung; sie werden als Teiltöne (früher Obertöne) oder „Harmonische“ bezeichnet. So ist stets auch die Oktave, also die Schwingung mit der doppelten Frequenz des Grundtons vorhanden. Den Klangcharakter eines Musikinstruments – aber auch der menschlichen Stimme – prägen so genannte Formanten. Das sind Frequenzen im jeweiligen Spektrum, die über den gesamten Tonumfang durch Resonanzen des Klangkörpers verstärkt werden und somit besonders klangprägend wirken. Reich an Formanten ist beim Klavier bereits das perkussive Anschlagsgeräusch. Es klingt kurz nach dem Anschlag schnell ab. Danach ändert sich der Ton sehr langsam, ohne die dramatischen spektralen Veränderungen der Anfangsphase. Auch das sind typische Eigenheiten des Klangverhaltens, die in den verschiedenen Tonlagen unterschiedlich ausgeprägt sind: Ein unge- ▶



Das „Feeling“ eines Bühnen-Auftritts mit Band simulieren moderne Digitalpiaons auch im heimischen Wohnzimmer.

ATELIER KÜHN

Die „Active Field Control“ imitiert einen Resonanzboden durch Rückkoppeln indirekter Schallanteile: Mikrofone nehmen den Klang von Klavier, anderen Musikern sowie alle Reflexionen im Raum auf, Lautsprecher auf der Rückseite geben das gefilterte Signal aus.



THORALF ABGARJAN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ATELIER KÜHN

dämpfter Basston beim Flügel verebbt erst nach Minuten. Setzt der Filz auf, geht das natürlich schneller, doch wieder in einer sehr charakteristischen Weise.

Je schneller der Anschlag, desto mehr Impuls überträgt der mit Filz überzogene Hammer, umso größer fällt die Schwingungsamplitude aus und damit die Lautstärke. Darüber hinaus wächst bei schnellerem Anschlag auch der Anteil hoher Frequenzen im Klangspektrum, denn je rascher der Hammer zurückfällt, desto weniger Energie-Anteile absorbiert er während der Kontaktzeit von der schwingenden Saite. So vermag ein Virtuose durch seinen Anschlag den Klang heller oder dunkler zu formen.

All diese Eigenheiten des akusto-mechanischen Instruments sollte ein Digitalpiano möglichst ebenfalls aufweisen. Doch eine naturgetreue Simulation all dieser komplexen Vorgänge mittels mathematisch-physikalischer Modelle wäre zu aufwendig. In diesem Bereich gibt es weiterhin Forschungsbedarf. Hersteller von Digitalpianos benutzen deshalb heute eine Variante des so genannten Samplings und kombinieren es mitunter mit Methoden des „Physical Modeling“. Wie schon bei ersten Produktgenerationen liest ein Prozessor auf Tastenanschlag digitale Aufzeichnungen des zugehörigen Klangs, so genannte Samples, aus einem Speicher, bearbeitet sie und reicht sie an den Verstärker weiter, der den Ton dann über Lautsprecher ausgibt. Die Technik wurde so weit verfeinert, dass heute selbst das charakteristische Abklingen des Tons durch ein separates Klangstück, das so genannte „Key-Off-Sample“, erreicht wird.

Weil sich bei härterem Anschlag nicht nur die Lautstärke, sondern wie erwähnt auch die spektrale Zusammensetzung ändert, zeichnet man den gleichen Ton bei verschiedenen Anschlagstärken auf und gibt dann beim Spiel das entsprechende Sample wieder (siehe Grafik Seite 88). Bei einem Tonumfang des Flügels von mehr als sieben Oktaven mit jeweils 12 Halbtönen ergibt sich dabei ein erheblicher Speicherbedarf: Aktuelle Digitalpianos halten mehr als 100 Megabyte an digitalisierten Spektren vor. In gewissen Grenzen verschafft ein einfacher Effekt Erleichterung: Werden die Aufnahmen durch Variation der Abtastrate schneller oder langsamer „abgespielt“, verringert beziehungsweise erhöht sich ihre Tonhöhe (fachlich „Transposition“). Das gilt dann aber für alle Signalanteile gleichermaßen, auch für die so wichtigen Formanten.

Problemfall Transposition

Transposition
aufwärts transponiertes Sample
Original-Sample
abwärts transponiertes Sample
Zeit

THORALF ABGARJAN

Wird der Originalton (Mitte) aufwärts transponiert, so wird die Einschwingphase (rot) und die Gesamtlänge verkürzt, im Falle der Abwärtstransposition verlängert (blau).

Neben der Klang verfremdenden Formantverschiebung gibt es noch einen weiteren unerwünschten Nebeneffekt, der sich besonders beim Abwärtstransponieren bemerkbar macht: Der Klang schwingt langsamer ein als der Originalton (siehe Grafik links unten), das Umgekehrte gilt beim Transponieren zu höheren Tönen. Angesichts immer leistungsfähigerer Datenspeicher streben die Hersteller deshalb danach, auf die Transposition von Samples ganz zu verzichten und jeden Einzelton in verschiedenen Lautstärken aufzunehmen.

Aktuelle Instrumente erzeugen sogar Resonanz-Effekte des akusto-mechanischen Klaviers. Tritt der Spieler das rechte Pedal, heben die Filzdämpfer ab und alle Saiten können frei schwingen. Schlägt er nun einen Ton an, werden andere Saiten mitschwingen, deren Spektren Frequenzen aus dem Klang des angeschlagenen Tons enthalten. Wäre das ein *c1*, würde auch die Saite des *c2* erklingen, denn die Oktave, also der Ton mit der doppelten Frequenz, ist ein Teilton des Spektrums. Ebenso verhält es sich mit allen anderen „reinen“ Intervallen, Tonabständen, deren Frequenzen in der Partialtonreihe eines Klangs bereits enthalten sind. Auch die Quinte geriete so in Resonanz, im Falle des *c1* also das *g1*, denn ihre Schwingungszahl beträgt 3/2 der Grundschwingung und ist ein Teilton. Von der Bauweise des Instruments und den verwendeten Materialien abhängige Resonanzeffekte verstärken im Übrigen noch charakteristische Frequenzanteile.

Dieses Verhalten zu imitieren, ist – bezogen auf die möglichen vielstimmigen Akkordvarianten – sehr problematisch. Anfangs zeichneten die Entwickler

zusätzlich zum „normalen“ Ton eines Flügels den bei gedrücktem Haltepedal auf und schalteten dann beim Spielen der Versuchsgeräte zwischen Resonanz- und Normal-Sample hin und her. Doch der Wechsel im Klangcharakter erwies sich als zu abrupt. Die Resonanz verändert sich nämlich je nachdem, welche und wie viele Töne wie stark gleichzeitig oder nacheinander angeschlagen werden. Es gibt nahezu unendlich viele Kombinationen und nur einen, noch dazu seltenen Fall – das Spielen eines einzelnen Tones mit gedrücktem Pedal – hatte man aufgezeichnet. In einer weiteren Entwicklungsstufe mischte man deshalb per Pedaldruck ein Resonanz-Sample dem normalen bei, doch Interferenzen ähnlicher Signalanteile verfremdeten diesmal den Gesamteindruck.

Erst die dritte Entwicklungsstufe, eine Kombination von Sampling und physikalischer Modellierung des reinen Resonanzanteils, lieferte gute Ergebnisse; entsprechende Instrumente sind seit einem Jahr auf dem Markt. Auch dafür wurden Normal- und Resonanz-Samples zunächst bestmöglich aufgenommen und digitalisiert. Unter der Annahme, Letzteres setze sich näherungsweise aus dem ohne Pedal angeschlagenem Ton und zusätzlichen Frequenzen zusammen, wird dieser Resonanz-Anteil durch Vergleich beider Spektren ermittelt.

Diese Aufgabe ähnelt allerdings der, aus dem Gesamtklang eines Orchesters ein einzelnes Instrument zu extrahieren. Als geeigneter Algorithmus erwies sich die *spectral modelling synthesis* der Universität Stanford. Die Schwingungskomponenten beider Aufnahmen wurden mittels Fourier-Analyse bestimmt, dann mit dem genannten Verfahren die zusätzlichen Anteile der Resonanzfrequenzen beziehungsweise die Veränderung der Teiltöne des Normal-Samples ermittelt. Daraus ließ sich der reine Resonanzanteil synthetisieren, speichern und beim Spielen mit getretenem Pedal dem Normal-Sample beimischen.

Die realitätsnahe Simulation der Klavierresonanz brachte aber ein neues Problem auf den Plan: die so genannte ▶

Der Physiker **Thoralf Abgarjan** *ist freier Mitarbeiter von Yamaha.*

Literaturhinweis

Digitale Klangerzeugung. Von Thoralf Abgarjan und Klaus-Dieter Linsmeier in: Die Physik der Musikinstrumente, Spektrum Akademischer Verlag, 2. Auflage, 1998.

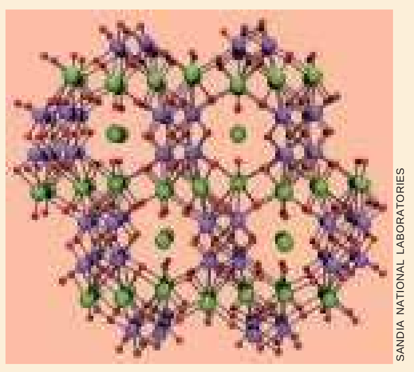
TECHNOGRAMM

UMWELTTECHNIK

Designer-Schwamm schluckt Schadstoffe

Einen hochselektiv wirkenden Filter zur Reinigung industrieller Abwässer haben Tina N. Nenoff und ihr Team an den Sandia National Laboratories (Kalifornien) entwickelt. Sein Kürzel, SOMS, bedeutet „Sandia Octahedrale Molekularsiebe“. Natrium-Schwefel-Oxid, versetzt mit den Übergangsmetallen Titan oder Zirkon, bildet einen Schwamm mit Poren zwischen vier und fünfzehn Ångström Durchmesser. Diese wirken als Ionenaustauscher, wie die Pressestelle der Forschungseinrichtung meldet: Doppelwertige Kationen aus dem Abwasser, durch die Porengröße selektiert, ersetzen schwächer geladene Ionen des Gitters.

Im Labortest trennten diese Filter beispielsweise 99,8 Prozent an Strontium-90-Ionen aus einer Lösung, obwohl der Gesamtgehalt an dem radioaktiven Element nur bei eins zu einer Million lag und außerdem chemisch sehr ähnliches Natrium in hoher Konzentration vorhanden war. Durch Steuerung der Porengröße und des chemischen Verhaltens der Filter im Nanometerbereich wollen die Forscher auch wertvolle Rohmaterialien aus industriellen Abwässern zurückgewinnen.


SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Das Kristallgitter des Filters wirkt wie ein Schwamm.

NANOTECHNIK

Silizium statt Ruß

Kohlenstoff-Nanoröhrchen sollen in der kommenden Nanoelektronik eine große Rolle spielen. Wissenschaftlern vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart gelang es nun, Vergleichbares aus einem Halbleiter herzustellen. Dazu brachten sie auf ein Halbleiter-Substrat zunächst eine „Opferschicht“ und darüber dann zwei dünne Lagen aus Materialien auf, deren Gitter nicht recht zueinander passten, sodass eine mechanische Spannung entstand. Wurde nun die Opferschicht schrittweise weggeätzt, löste sich die darüber liegende Doppelschicht als dünne Folie ab und rollte sich aufgrund der Spannung zu einem Nanoröhrchen auf. Ein solches Röhrchen ließe sich beliebig auf der Substrat-Oberfläche platzieren, und sein Durchmesser je nach Wahl der mechanischen Verspannung zwischen den Schichten einstellen. Mittels Aufdampftechniken wie der Molekularstrahlepitaxie könnten auch Isolatoren, Metalle und Polymere aufgetragen und so neuartige Nano-Objekte gefertigt werden (*Nature, Heft 410, S. 168, 2001*).



MPI STUTTGART

Noch relativ dick: eine Halbleiter-Nanoröhre

WERKSTOFFE

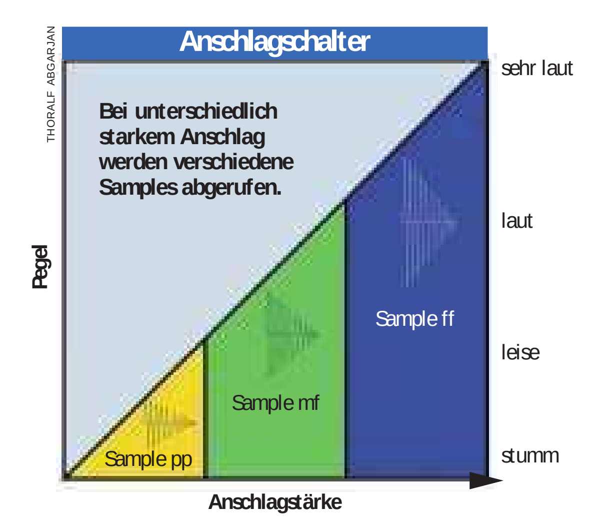
Holz, sauer eingelegt

Feuchte lässt Holz quellen und fördert Pilzbefall. Als Gegenmittel wird der Werkstoff seit kurzem bei Temperaturen über 180 Grad Celsius für mehrere Stunden „gebacken“. Allerdings wird das Holz dunkler, und die Festigkeit lässt nach. Hitzevergütetes Holz bietet sich deshalb vor allem für Fenster, Gartenmöbel und Fassadenverkleidungen an.

Als zusätzliche Option untersucht das Fraunhofer-Institut für Holzforschung (Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI) die Möglichkeiten der Acetylierung. Bei dieser Methode werden Hölzer von Pappel oder bestimmten Kiefernarten mit Essigsäureanhydrit imprägniert. Die Chemikalie reagiert mit Hydroxylgruppen (-OH) des Werkstoffs zu Acetylgruppen (-CO-CH_3) und spaltet dabei Essigsäure ab. Der Vorteil: die sehr großen Acetylgruppen halten das Material dauerhaft gequollen, sodass es auf Feuchte kaum noch reagieren kann. Das Verfahren ändert die Farbe wenig, die Festigkeiten werden teilweise sogar verbessert. Ab 2002 soll ein entsprechendes Werk jährlich 50 000 Kubikmeter Holz verarbeiten.


WKI

Bei 200 Grad Celsius verändern Fichte (oben) und Buche durch eine Hitzevergütung ihre Farbe.



Spreizung. Ein Klavier ist nämlich niemals wirklich rein gestimmt. Das beginnt schon mit der Temperierung, einem minimalen Verstimmen verschiedener Intervalle gegenüber den mathematisch exakten Frequenzverhältnissen, die es erst ermöglicht, jede Tonart auf dem Instrument spielen zu können. Dazu kommt, dass sich die Klang bestimmenden elastischen Eigenschaften der Saiten über die verschiedenen Lagen hinweg verändern. Beispielsweise verschiebt sich der zweite Teilton einer Saite in hoher Lage leicht nach oben, stimmt also nicht mehr exakt mit dem Grundton der Oktave überein. Erklingen zwei Töne mit nur gering verschiedenen Frequenzen, ergeben sich Schwebungen – die hohe Kunst eines Klavierstimmers besteht darin, sie durch gezieltes Verstimmen zu minimieren. Deshalb sind Töne in den hohen Lagen etwas höher, in den tiefen etwas tiefer; das bezeichnet man als Spreizung. Die muss ein Digitalpiano, das Resonanzeffekte imitiert, freilich auch aufweisen. So perfekt der Klang nun modelliert sein mag, bei der Wiedergabe über Verstärker und Lautsprecher erweist sich das Digitalpiano dann doch als Ersatz ohne wirklichen Klangkörper. Denn Klavier und Flügel strahlen Schall großflächig über Korpus und Resonanzboden ab. Doch auch dafür gibt es mittlerweile ein Analogon, nämlich die aus der Theaterbeschallung stammende Active-Field-Control (AFC). Sie beruht auf der kontrollierten Rückkopplung von Anteilen eines abgestrahlten Klangfeldes; als Produkt wird sie voraussichtlich 2002 auf den Markt kommen.

Der vom Tongenerator erzeugte Klang wird zunächst auf der Frontseite von Lautsprechern abgestrahlt. Mikrofone nehmen bei AFC indirekten Schall aus der Umgebung auf. Lautsprecher auf der Gehäuserückseite geben das bearbeitete Ergebnis aus, der Klang wird im Raum reflektiert und von den Mikrofonen wieder aufgenommen. Auf diese Weise entsteht ein flächenhaftes Schallfeld, das der Klangabstrahlung eines Resonanzbodens ähnelt. Ein digitaler Filter verhindert dabei unangenehme Rückkopplungs-Effekte.

Auch das Empfinden des Musikers ändert sich dabei: Die „räumliche Distanz“ zum Instrument – häufige Kritik an digitalen Pianos – verschwindet. Da Signalanteile aus der Umgebung des Instruments berücksichtigt werden, ist die Raumakustik selbst Quelle des Nachhalls beziehungsweise des Nachklangs wie bei einem „wirklichen“ Instrument.

Um den virtuellen Resonanzboden eines Flügels zu erhalten, werden die Testdaten bei der Inbetriebnahme mit Sollwerten verglichen und die Parameter entsprechend optimiert. Absorbiert der Raum stark, so wird zum Beispiel die Rückkopplung verstärkt, ist er sehr groß und die Laufzeit der reflektierten Signale entsprechend lang, sorgt der Filter dafür, dass der wieder abgestrahlte Klang schneller ausklingt.

Man sieht es ihnen nicht an, doch moderne Digitalpianos imitieren komplexe Prozesse der akusto-mechanischen Vorbilder mit großer Raffinesse. Sie werden die Originale zwar nicht ersetzen, eine Alternative sind sie allemal. ■

NEURONALE NETZE

Die Messlatte liegt bei Null

Fehler beim Spritzgießen von Kunststoffteilen erzeugen teuren Ausschuss. Mit neuronalen Netzen scheint die Null-Fehler-Marke in greifbarer Nähe.

Von Wolfgang Rauh und Ernst Schmidberger

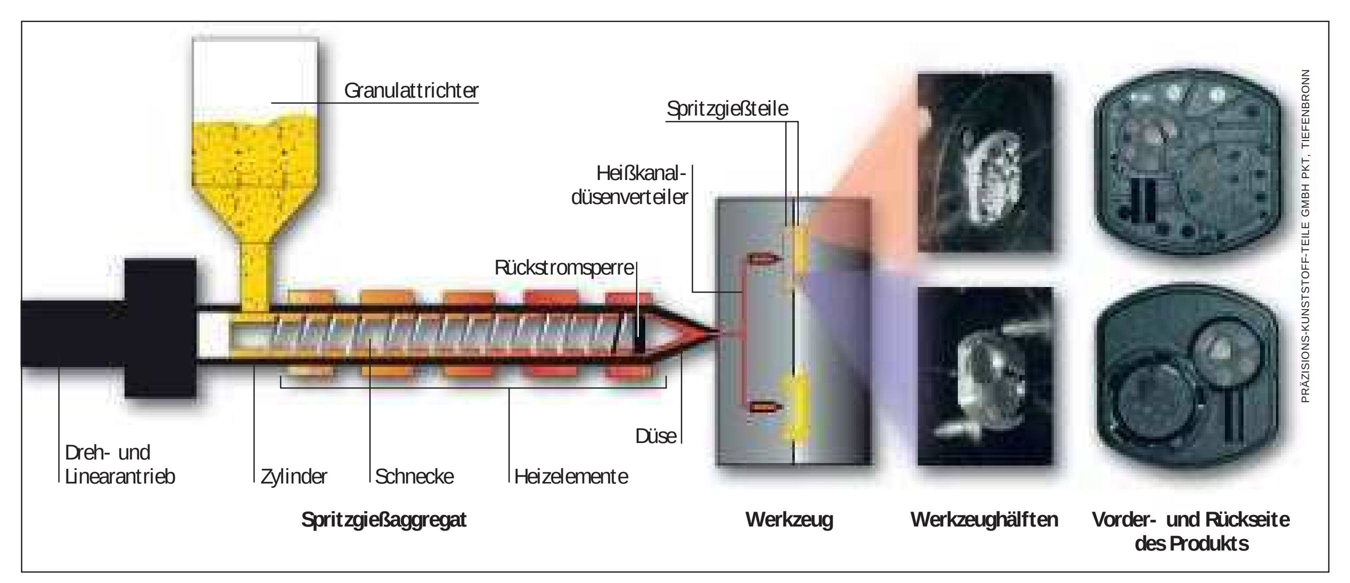
Weniger als vier Sekunden dauert die Herstellung einer Compact Disc, selbst der Grundkörper einer Telefonzelle entsteht in knapp acht Minuten. Derartige Taktraten ermöglicht der Kunststoffspritzguss, der etwa Mitte der 50er Jahre seinen Platz in der industriellen Fertigung fand. Das Grundprinzip klingt einfach: Granulat und Zusatzstoffe werden aufgeschmolzen, gut vermengt und dann unter Druck in eine Form eingespritzt; dabei erreichen moderne Maschinen Geschwindigkeiten und Drücke von bis zu einem Meter pro Sekunde und 3000 bar. Nach dem Abkühlen öffnet sich das Formwerkzeug, das Produkt wird ausgestoßen und der nächste Zyklus gestartet. Nur eines trübt die Freude: Schwankungen der Werkstoffeigenschaften oder im Prozessablauf verursachen teuren Ausschuss.

Dagegen setzen die Unternehmen Maschinenregelungen und eine statistische Qualitätskontrolle: Sensoren erfassen Drücke, Temperaturen und Geschwindigkeiten in der Anlage, weichen diese von Sollwerten ab, wird nachgeregelt, ebenso, wenn Stichproben fertiger Produkte während einer laufenden Serie eine Tendenz zu schlechterer Qualität anzeigen. Trotz dieser Maßnahmen erweisen sich im Durchschnitt ein bis vier Prozent der Produkte als fehlerhaft. Schärfere Haftungsbestimmungen, höhere Rohstoffkosten, der Preisdruck der Abnehmer und vieles mehr legen die Latte aber höher – auf null Fehler!

Die gute Nachricht: Fehler beim Spritzgießen beruhen zu etwa 80 Prozent auf Schwankungen im Prozess, müssten



Kunststoffbehälter aller Art wie Compact Discs, Spritzen und Telefonzellen bringt der Spritzguss in Form.



Beim Spritzguss wird Granulat aufgeschmolzen und über eine Schnecke zur Düse befördert, dort zwischen zwei Werkzeughälften – hier für eine Uhrenplatine – gespritzt. Während das Produkt erstarrt, kann der nächste Zyklus anlaufen. Neuronale Netze regeln neuerdings diesen Prozess, um Ausschuss zu vermeiden.

sich also durch bessere Regelungsmethoden vermeiden lassen. Ideal wäre dazu ein mathematisches Modell, doch wäre das schwer zu entwickeln, denn die Zahl der Einflussgrößen und ihre Wechselwirkungen untereinander sind beträchtlich. Zudem lassen sich Abweichungen in Qualitätsmerkmalen wie Geometrie, Oberflächengüte oder Festigkeit selten durch einfache Gleichungen auf Prozessschwankungen beziehen.

Zum Glück bietet die Prozessdatenverarbeitung Alternativen. Statt einen Vorgang im Detail mathematisch zu beschreiben, sollen momentane Situationen sozusagen intuitiv erfasst und bewertet werden. Das ist die Stärke künstlicher neuronaler Netze. Wie ihr biologisches Vorbild, das Gehirn, können sie nach einem guten Training Situationen klassifizieren – etwa ob Druck- und Temperaturverlauf der Kunststoffschmelze im Werkzeug „zu niedrig“, „richtig“ oder „zu hoch“ sind – und ihren Einfluss auf die Produktqualität vorhersagen. Innerhalb kürzester Zeit muss klar sein, ob die gegebene Konstellation von Parametern ein fehlerfreies Produkt hervorbringen wird, und wenn nein, welche Parameteränderungen Probleme vermeiden.

Ein Netz von Netzen beim Gewichtstraining

Wie natürliche Nervenzellen empfangen die künstlichen Neuronen – tatsächlich sind es Software-Module – Informationen, die sie anhand mathematischer Funktionen verarbeiten und an andere Neuronen weiterreichen. Ein Netz umfasst zumindest eine Eingabeschicht, eine oder mehrere verdeckte Schichten und eine Ausgabeschicht, um Messdaten aufzunehmen, auszuwerten und das Ergebnis an weitere Softwarefunktionen etwa zur Parameteränderung zu übergeben. Stets sind alle Neuronen einer Schicht mit allen Neuronen der nachfolgenden verbunden und tragen somit zum Gesamtergebnis bei, doch „Gewichte“ entscheiden über den jeweiligen Anteil der Informationsweiterleitung zwischen den Neuronen. Sie werden beim Trainieren eines Netzes justiert: Das Netz erhält einen Datensatz, den es beispielsweise klassifizieren oder quantifizieren soll, und dazu eine Lösung; es vermag Abweichungen seiner Berechnung vom Soll zu erkennen und durch Änderung der Gewichte zu minimieren.

Obwohl das prinzipiell automatisch abläuft, ist so ein neuronales Netz keine „Black-Box“. Sein Aufbau, die geeigneten Algorithmen für Datenverarbeitung und Training wie auch die Gestaltung des Musterdatensatzes modellieren den jeweils zu überwachenden Prozesses – allerdings nicht im Sinne einer exakten mathematischen Beschreibung – und erfordern meist spezielle, an den jeweiligen Aufgaben orientierte Anpassungen.

Wir haben gemeinsam mit Instituten der Universität Stuttgart und verschiedenen Unternehmen der Branche ein System entwickelt, das jeweils kurz vor Ende der Kühlphase die zu erwartende Qualität prognostiziert, parallel dazu die eventuell notwendigen Änderungen der Maschineneinstellungen. Unsere Netze sind im Grunde einfach konstruiert, wir verwenden die häufige Variante der vorwärts gerichteten Netze (fachlich „Feedforward“), bei denen die Daten von den Eingangsneuronen über die der verdeckten Schichten zur Ausgangsschicht gelangen. Nur beim Training verläuft der Fluss in umgekehrter Richtung (Backpropagation-Lernalgorithmus). Mit der Anzahl der Neuronen und deren Gewichtsverbindungen wächst leider auch der Umfang der Trainingsmuster. Das steht im Widerspruch zur Forderung der Anwender nach geringem Versuchsaufwand. Abhilfe schaffen merkmalsbezogene Netze mit einfacher Topologie – jedes überwachte Qualitätsmerkmal und jeder Einstellparameter hat ein eigenes Netz –, die mit einem speziellen Netzgenerators automatisch erzeugt werden.

Eine entsprechend ausgerüstete Anlage arbeitet seit April 2000 in der Serienproduktion von Uhrenplatinen zur Aufnahme der mechanischen und elektrischen Komponenten (siehe Grafik oben). Nach Angaben des Betreibers trat seither im laufenden Prozess praktisch kein Ausschuss mehr auf. ■

*Der promovierte Maschinenbauer **Wolfgang Rauh** leitet die Abteilung Informationstechnik am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart. Der Produktionstechniker und technische Kybernetiker **Ernst Schmidberger** ist dort Projektleiter für „Qualitätsorientierte Prozessregelung in der Kunststoffverarbeitung“.*

UMWELTFORSCHUNG

Sehenden Auges in die Klima-Katastrophe?

Der neue Klima-Bericht der Vereinten Nationen macht unmissverständlich klar: Die Erdatmosphäre erwärmt sich stärker und schneller als bisher angenommen.

Von Uwe Reichert

Die Nachricht ist eigentlich nicht neu: Die Temperatur der Erdatmosphäre steigt im globalen Mittel an. Doch die Zahlen, die der aktuelle Bericht der Vereinten Nationen zum Klimawandel enthält, sprechen eine deutliche Sprache: Der Temperaturanstieg ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen, er verläuft weit schneller als befürchtet, und er wird dramatische Auswirkungen auf die Umwelt und die Weltbevölkerung haben.

Der in drei Teilen vorgelegte Bericht des „Zwischenstaatlichen Gremiums für Klimaveränderungen" ist die bislang fundierteste Untersuchung zum globalen Klimawandel (im Internet erhältlich unter www.ipcc.ch). Mehrere hundert Wissenschaftler haben daran mitgearbeitet. Ihre Ergebnisse sollten eigentlich in allen Regierungen, in allen Kommunen und bei jedem einzelnen Bürger die Alarmglocken schrillen lassen.

Die Messdaten zeigen, dass im 20. Jahrhundert die Lufttemperatur in Bodennähe im weltweiten Mittel um etwa 0,6 Grad zugenommen hat. Die 1990er Jahre waren das wärmste Jahrzehnt und das Jahr 1998 das wärmste seit Beginn der systematischen Temperaturmessungen 1861. Unter Zuhilfenahme von historischen Aufzeichnungen und Datenmaterial, das aus Baumringen, Korallen und Eisbohrkernen gewonnen wurde, kommen die Forscher zu dem beunruhigenden Schluss, dass noch nie im letzten Jahrtausend die Temperatur derart rapide angestiegen ist.

Besonders gravierend sind die Veränderungen im Tagesverlauf der Temperaturen. Während sich die Tageshöchsttemperatur seit 1950 um 0,1 Grad pro Jahrzehnt erhöht hat, sind die nachts gemessenen Minimaltemperaturen doppelt so stark gestiegen, nämlich um 0,2 Grad pro Jahrzehnt. Als Folge davon hat die Anzahl der frostfreien Tage in den gemäßigten Zonen zugenommen. Dies wiederum hat dazu geführt, dass die Vegetationsperiode heute länger währt und die Gewässer etwa zwei Wochen im Jahr länger eisfrei sind als noch vor einem Jahrhundert. Die Daten von Erdbeobachtungssatelliten belegen zudem, dass seit dem Ende der sechziger Jahre die winterliche Schneebedeckung um zehn Prozent abgenommen hat. Gebirgsgletscher ziehen sich zurück, und selbst die Eisdecke des Nordpolarmeeres ist deutlich dünner geworden.

Freilich steht weit mehr auf dem Spiel als der Wintersport-Tourismus und das empfindliche Ökosystem der Arktis. Weltweit wird es zu Klimaverschiebungen kommen, wobei die einzelnen Regionen auf unterschiedliche Weise betroffen sein werden. Bis zum Jahr 2100, so die Prognose der UN-Experten, wird der Meeresspiegel um neun bis 88 Zentimeter ansteigen. Die Atmosphäre wird dann im Mittel 1,4 bis 5,8 Grad Celsius wärmer sein als 1990. Durch Verschiebung der Niederschlagszonen werden manche Regionen unter Wassermangel, andere verstärkt unter Überschwemmungen zu leiden haben.

Neben vielen Inselstaaten wie etwa den Malediven werden insbesondere die Küstenregionen von Ägypten, Vietnam und Florida von Überflutungen bedroht sein. Ganze Landstriche indes werden austrocknen, die Ernteerträge vor allem in den tropischen und subtropischen Zonen zurückgehen. Bereits heute leben 1,7 Milliarden Menschen in Regionen, in denen mehr als 20 Prozent der vorhandenen Wasserressourcen verbraucht werden; im Jahre 2025 werden es etwa 5 Milliarden sein. Als Folge davon wird die Anzahl von Umweltflüchtlingen zunehmen, ebenso die Anzahl umweltbedingter Konflikte. Ganze Gesellschaften und Staatswesen werden dadurch in ihrem Zusammenhalt gefährdet.

Hauptursache dieser dramatischen Entwicklung ist der Mensch. Die Nutzung fossiler Brennstoffe, die Landwirtschaft, die Rodung tropischen Regenwalds und die chemische Produktion setzen Gase frei, die den natürlichen Treibhauseffekt der Erde verstärken und dadurch die Lufttemperaturen ansteigen lassen. Zu den wichtigsten anthropogenen Treibhausgasen zählen Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), Ozon (O_3) und verschiedene Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Alle diese Gase zusammen machen zwar nur 0,3 Prozent der Masse der Atmosphäre aus. Weil sie aber die von der Erdoberfläche abgestrahlte Wärmeenergie daran hindern, in den Weltraum zu entweichen, sind sie dennoch für das Klima hoch wirksam.

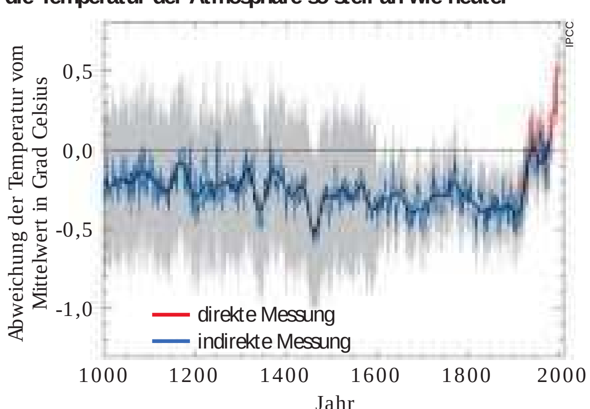
Die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre hat seit Beginn der Industrialisierung um ein Drittel zugenommen. Damit ist der heutige CO_2-Gehalt so hoch wie in den letzten 20 Millionen Jahren der Erdgeschichte nicht mehr. Drei Viertel des anthropogenen Ausstoßes an CO_2 ist auf das Verbrennen fossiler Energieträger zurückzuführen. Deshalb sehen die UN-Experten hier auch den besten



Endzeitstimmung: Der Raubbau des Menschen an der Natur rächt sicht.

BURKARD / BILDERBERG

Die Erde hat Fieber: Noch nie im letzten Jahrtausend stieg die Temperatur der Atmosphäre so steil an wie heute.



Ansatzpunkt für Gegenmaßnahmen. Der Einsatz neuer Technologien wie etwa Windturbinen, Hybridmotoren oder Energie durch Biomasse könnte den Ausstoß von Treibhausgasen wesentlich verringern. Des Weiteren müssten Maßnahmen zur Einsparung und besseren Nutzung von Energie umgesetzt werden. Große Bedeutung wird auch Wäldern und landwirtschaftlichen Flächen als Speicher von Kohlendioxid beigemessen.

Die internationale Staatengemeinschaft hatte kürzlich einen Versuch gemacht, das Problem des Klimawandels anzugehen. Auf der Klimakonferenz in Kioto hatte sie sich 1997 darauf geeinigt, die Emissionen der sechs wichtigsten Treibhausgase bis spätestens 2012 im Vergleich zur Emissionsmenge von 1990 um durchschnittlich 5,2 Prozent zu senken. Für jedes Land waren dabei individuelle Quoten festgelegt worden. Die USA hatten sich verpflichtet, um 7 Prozent zu reduzieren, die Länder der Europäischen Union wollen insgesamt 8 Prozent einsparen; Deutschland strebt eine Reduktion um 21 Prozent an. Auf der Folgekonferenz in Den Haag letzten November konnte allerdings keine Einigung darüber erzielt werden, wie dieses anspruchsvolle Ziel erreicht werden könne.

Zudem sind alle Länder weit davon entfernt, ihren Ausstoß an Treibhausgasen zu stabilisieren, geschweige denn zu reduzieren. Allein die USA, auf die ein Viertel der weltweiten Kohlendioxid-Emissionen entfallen, haben seit 1990 den jährlichen Ausstoß an CO_2 um 720 Millionen Tonnen gesteigert. In dem Land, in dem ein Liter Benzin nur halb so viel kostet wie ein Liter Mineralwasser, bläst jeder Bürger rein statistisch 20,5 Tonnen CO_2 pro Jahr in die Luft. Ein Japaner hingegen bringt es auf 9,3, ein EU-Bürger auf 8,6, ein Chinese auf 2,5 und ein Inder nur auf 0,9 Tonnen CO_2 pro Jahr.

Die Bringschuld liegt also eindeutig bei den Industriestaaten. Spätestens auf der nächsten Klimakonferenz im Juli in Bonn wird sich zeigen, wie ernst sie ihre in Kioto eingegangene Verpflichtung nehmen. Viel Hoffnung werden sich die Bürger dieser Welt aber wohl nicht machen dürfen. Nachdem die Delegation der USA in Den Haag bereits alles daran setzte, die Vereinbarungen von Kioto zu verwässern, hat nun der neue Präsident George W. Bush angekündigt, das Kioto-Abkommen dem US-Kongress überhaupt nicht zur Ratifizierung vorzulegen. ■

Uwe Reichert ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AM RANDE

Mit der Maul- und Klauenseuche zurück ins Mittelalter

Wie in Großbritannien eine Tierkrankheit bekämpft wird

Im Seminarraum, zwei Stockwerke unter meinem Büro, hängt er als Trophäe an der Wand, der Erreger der Maul- und Klauenseuche, kurz MKS-Virus. Im Februar 1989 veröffentlichte die Arbeitsgruppe von David Stuart am 1988 gegründeten Oxford Centre for Molecular Sciences, die hochaufgelöste Struktur des Virus und errang damit eine besondere Auszeichnung für Wissenschaftler – eine Abbildung des Virus auf dem Titelblatt von Nature. Wie Stuart in Nature schrieb, „sollte das Wissen um die Struktur des Studienobjekts bei der Entwicklung verbesserter und neuartiger Impfstoffe behilflich sein und könnte zu anti-viralen Medikamenten führen."

Fast auf den Tag genau zwölf Jahre später sucht ebendieses Virus Viehbestände in Großbritannien heim. Zwölf Jahre, sollte man meinen, müssten hinreichend sein, um einen verbesserten Impfstoff, ein Medikament und/oder eine wirkungsvolle Diagnostik zu entwickeln. Man könnte also, im Lande des Ur-Impfers Edward Jenner, der die Pockenimpfung einführte, und am Beginn des 21. Jahrhunderts, einem solchen wohl erforschten molekularbiologischen Problem mit wohl durchdachten wissenschaftlich fundierten Lösungen begegnen?

Falsch gedacht. Was wirklich geschah war, dass das Landwirtschaftsministerium auf einen Katastrophenplan aus den zwanziger Jahren zurückgriff, der hinwiederum sich von seinen Vorgängern im Mittelalter nur dadurch unterscheidet, dass es damals noch keinen Dieselkraftstoff und keine Traktoren gab. Kurz gesagt, erkrankte Tiere und die gesunden Tiere in einem gewissen Umkreis wurden geschlachtet, zu riesigen Kadaverbergen aufgehäuft, mit Diesel übergossen und open air verbrannt.

Dass dabei jede Menge Diesel in den Boden sickert und das Grundwasser verseucht, wen kümmert's? Dass bei den schlechten und unvollständigen Verbrennungsbedingungen infektiöse Viruspartikel in die Luft geschleudert und mit dem Wind zu anderen Bauernhöfen getragen werden, ist auch nur wenigen aufgefallen. Dass Füchse, Ratten und andere räuberische Gesellen sich an den Kadaverbergen schon vor der Verbrennung gütlich tun und dann in Missachtung des Bewegungsverbots für Tiere die Seuche weitertragen, auch eine bedauerliche Panne.

Und warum das alles? Ließe man der Seuche ihren Lauf, so würden daran nach Erfahrungen aus anderen Ländern vielleicht fünf Prozent der Tiere sterben. Eine Extrapolation der gegenwärtigen Strategie könnte hingegen bedeuten, dass die Hälfte des Viehbestands ins Gras beißt. Ließe man die gefährdeten Tiere impfen, so würde sich – trotz aller Zweifel an der vollständigen Wirksamkeit der existierenden Impfstoffe – ein sehr viel unblutigeres Ende abzeichnen. Aber dann, und das ist der Haken, könnte Großbritannien über Jahre hinweg kein Vieh mehr exportieren (weil man nämlich immer noch die alte, zu unempfindliche Diagnostik und damit dann keine Methode hat, ein infiziertes von einem geimpften Tier zu unterscheiden: Die gebildeten Antikörper sind gleich).

DAVID STOECKLEIN / THE STOCK MARKET

Und das ist der Punkt, wo mein Hirn nicht mehr mitmacht. Um ein Exportgeschäft zu schützen, das nach Ansicht Vieler ebenso sinnlos wie grausam ist und lediglich 50 Millionen Pfund im Jahr an Gewinn erwirtschaftet, werden Milliarden verheizt und neuerdings auch von der Armee, die ja hinreichend Erfahrung mit sinnlosen Manövern hat, verbuddelt. Zusätzlich gehen Milliarden im Tourismus verloren, der bisher – Stichwort „Ferien auf dem Bauernhof" – das einträglichste Geschäft der britischen Bauern war. Bei den Strategiebesprechungen ist offenbar nicht nur die Molekularbiologie, sondern auch die Arithmetik draußen vor der Tür geblieben.

Doch die erschreckendste Frage ist: Was, wenn ein ebenso infektiöses, aber für Menschen lebensgefährliches Virus eine neue Epidemie auslöst – werden wir dann ebenfalls auf die Rezepte des Mittelalters zurückgreifen, auf Pestmasken und Weihwasser?

Michael Groß

www.michaelgross.co.uk

TALENTFÖRDERUNG

Neue Mathematik-Projekte für Schüler

Mit Unterstützung der Volkswagen-Stiftung werben die Universitäten um Nachwuchs-Mathematiker.

Von Christoph P. Pöppe

Es gibt sie sehr wohl, die Begeisterung für Mathematik, den allgemeinen Ekelsprüchen zum Trotz, auch und gerade unter Jugendlichen; aber in der Regel schlummert sie, und der übliche Mathematikunterricht ist nicht dazu angetan, das zu ändern.

Um so erstaunlicher ist der Erfolg einzelner Erweckungsbewegungen: Die 1983 von dem Hamburger Erziehungswissenschaftler Karl Kießwetter initiierten Samstagskurse für Schüler finden nach wie vor regen Zulauf, ehemalige Teilnehmer haben an anderen Orten bereits Ableger gegründet. Zahlreiche Schülerzirkel gedeihen, in der Regel durch die Initiative von Einzelpersonen. Mathematik-Wettbewerbe sind wahre Massenveranstaltungen geworden. Auf der Tagung „Mathe ist TOP“, welche die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV) im September vergangenen Jahres in Duisburg zu diesem Thema veranstaltete, trat eine erstaunlich hohe Anzahl von Graswurzel-Initiativen ans Licht.

Die neu erblühte Liebe der DMV (die wesentlich von Universitäts-Mathematikern getragen wird) zu den Schülern ist nicht ganz uneigennützig: Den mathematischen Fakultäten bleiben die Studienanfänger weg, und das trotz zur Zeit exzellenter Berufsaussichten für Mathematiker. Da liegt es für die Universitäten nahe, sich verstärkt um den Kontakt zur Schule zu bemühen. Zu geeignet vorbereiteten „Tagen der offenen Tür“ strömen die Schüler bereits in Massen in die Hochschulen, auch zu den Mathematikern; für deren Interessen wären allerdings Projekte längerer Dauer mit besonders Begabten eher angemessen, aber auch mit mehr Aufwand verbunden.

Christoph P. Pöppe *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Um der daraus resultierenden Zaghaftigkeit aufzuhelfen, hat die Volkswagen-Stiftung einen Geldtopf bereitgestellt und die Universitäten aufgefordert, sich um eine Portion aus diesem Topf zu bewerben („Perspektiven der Mathematik an der Schnittstelle von Schule und Universität“, www.volkswagenstiftung.de/infotext/infopers.htm). Vierzehn Projekte erhielten einen Zuschlag in Höhe von je 50 000 Mark; auf einem Workshop in Berlin wurden sie im Februar vorgestellt.

Eine gewisse Zaghaftigkeit war auch bei der Vorstellung noch zu spüren. Nicht bei der Auswahl der Themen – da hatten die Initiatoren klare und überzeugende Vorstellungen. Aber den Kontakt zu kooperationsbereiten Lehrern herzustellen wurde allgemein als eher mühsam empfunden, und für die regelmäßige Arbeit mit Schülern mochte man sich eher nicht persönlich engagieren, sondern lieber Examenskandidaten für das Lehramt dazu heranziehen.

Interessanterweise verfügen zwei der Projekte über langjährige Erfahrungen, weil sie aus der wettbewerbsorientierten Talentförderung der DDR hervorgegangen sind. Das Institut für Mathematik der Humboldt-Universität Berlin will Sommerschulen und wöchentliche Arbeitsgemeinschaften, die es seit jeher zusammen mit (Ost-)Berliner Spezialschulen betreibt, zu einem (Gesamt-)„Berliner Netzwerk“ ausweiten; und die kleine, aber feine Mathematik-Zeitschrift „Wurzel“, die seit 1967 an der Universität Jena herausgegeben wird, bereichert ihr Programm durch Ferienakademien für jeweils etwa 40 Schüler. ■

ANALYSE DES WISSENSCHAFTSRATES

Sind die Hochschulen fit für die Hightech-Zukunft?

Der alte und der neue Vorsitzende des Wissenschaftsrates, Winfried Schulze und Karl Max Einhäupl, zeigten anlässlich der Amtsübergabe die aktuellen Herausforderungen an die deutschen Hochschulen auf.

Von Claus M. Schmidt

Ein Phantom ging um in Deutschland. Das Phantom vom arbeitslosen Akademiker, der Proletarisierung der Elite, der hoffnungslosen Überqualifikation einer ganzen Nation. Die Klischeefigur, die erstmals vor 15 Jahren auftauchte und die sich seither explosiv vermehrt, hat längst einen Namen: Bürobote Dr. X und Taxifahrer Dr. Y. Allerdings – wie so oft bei Vorurteilen – gab und gibt es hier und da tatsächlich den Pförtner Dr. Z als lebenden Beweis.

Dies mögen Sonderfälle sein, begründet aus individuellen Biografien und Motiven – keinesfalls jedoch sind sie heute die Regel. Und spätestens seit dem Wink mit der Greencard auf der Cebit 2000 nach Internet-Indern aus aller Welt ist klar, dass von einer Überqualifikation hier zu Lande keine Rede sein kann. Ganz im Gegenteil. Das Dilemma kam nicht von heute auf morgen, sondern ist Resultat einer langfristigen Fehlentwicklung. Und die war so evident, dass eigentlich schon längst alle Alarmglocken hätten schrillen müssen. Mag sein, dass die Wende und der Aufbau Ost die bereits in den 80er Jahren geforderte Reform aufs Eis legte.

Und doch schlug es ein wie der Blitz aus heiterem Himmel, als der Wissenschaftshistoriker Winfried Schulze 1998 beim Antritt seines dreijährigen Amtes als Vorsitzender des Wissenschaftsrates die Träger der Hochschulen mit einer erschreckenden Analyse konfrontierte: Damals betrug der Anteil der Hochschulabsolventen an der Gesamtzahl der Erwerbstätigen in Deutschland 16 Prozent. Ein Anteil, der weit hinter dem der USA (29 Prozent), der Niederlande (28 Prozent), Norwegens (26 Prozent) und Kanadas (21 Prozent) zurück liegt.



Damit war die Marschrichtung klar: Nicht eine Akademikerschwemme gilt es zu bremsen, sondern eine höhere Quote herbeizuführen. Die vom Wissenschaftsrat angestrebte Akademisierungsquote liegt eher bei 40 statt bei 30 Prozent. Bereits 2015 werden 30 Prozent aller Arbeitsplätze mit Hochschulabsolventen besetzt sein, wie der Arbeitskreis „Fortschreibung Beschäftigungsperspektiven" im Mai 2000 feststellte. Das war nicht nur einfach eine neue, es war eine revolutionäre Einsicht. 40 Prozent jedes Jahrgangs mit akademischer Qualifikation werden benötigt, um die Herausforderungen zu meistern, die Schulze nun bei der Amtsübergabe an seinen Nachfolger, den Neurologen Karl Max Einhäupl, als „Compu-, Nano-, Robo- und Geno-Zukunft" umschrieb.

Doch die Ausbildung heute hat nur noch wenig gemein mit der Situation in den sechziger Jahren, als lediglich fünf Prozent jedes Jahrgangs ein Studium absolvierten. Die Hochschulen müssen sich auf die Massenausbildung einstellen. „Ein Leichtes, wenn man einfach die Durchlaufzeit reduziert oder die Ansprüche runterschraubt", erteilt Schulze den schlichten Lösungsvorschlägen eine Absage. Wie aber können die Massen qualifiziert ausgebildet werden, ohne dass dabei Forschung und Lehre zu kurz kommen?

Nach der Bedarfsanalyse empfahl Schulze qualitätssichernde Maßnahmen zur besseren Nutzung der vorhandenen Kapazitäten, die für manchen im Forschungs-, Verwaltungs- und Lehrbetrieb schockierend waren:

- Einführung von Controlling-Methoden durch Evaluation;
- Einführung einer leistungsorientierten Besoldung sowie Besetzung von Lehrstühlen auf Zeit und nicht mehr auf Lebenszeit;
- Aufteilung in Bachelor- und Masterdegree-Studiengänge. Dies erlaubt vielen Studenten eine Abkürzung der Studiendauer auf drei Jahre – mit international anerkanntem Abschluss.

Ganz schön viel, was der scheidende Vorsitzende in nur drei Jahren ins Rollen gebracht hat. So fragte sein Nachfolger Einhäupl bei seinem ersten Auftritt vor ▶

der Presse auch bescheiden: „Gibt es überhaupt noch was nach Schulze, was sich der Wissenschaftsrat vornehmen kann?“ Er präsentierte auch gleich die Antwort: „Weiter gehen auf dem Weg.“ Und zwar mit vier Schwerpunkten:

Medizin: Hier ist der Reformbedarf besonders groß, denn die großen Universitätskliniken – wie etwa die Berliner Charité oder Großhadern bei München – sind zunehmend gefordert als Anbieter von Hochleistungsmedizin. Notwendigerweise kollidiert da die Verantwortung für Patienten mit den Aufgaben in Forschung und Lehre. Besonders in der medizinischen Forschung und in diagnostischen Verfahren will Einhäupl Karrierewege für Naturwissenschaftler einrichten.

Forschungspolitik: Verstärkt soll die Wirtschaft in die Forschung und Lehre einbezogen werden. Denn auf vielen Gebieten der Genforschung zum Beispiel ist die Industrie führend. Kooperationen und Partnerschaften sind hier geboten. Allerdings nicht nach amerikanischem Modell. Denn es hat sich gezeigt, dass aufgrund der unterschiedlichen Geschichte die Bereitschaft der deutschen Industrie, Forschung oder Lehre zu sponsern oder hier zu investieren, minimal ist.

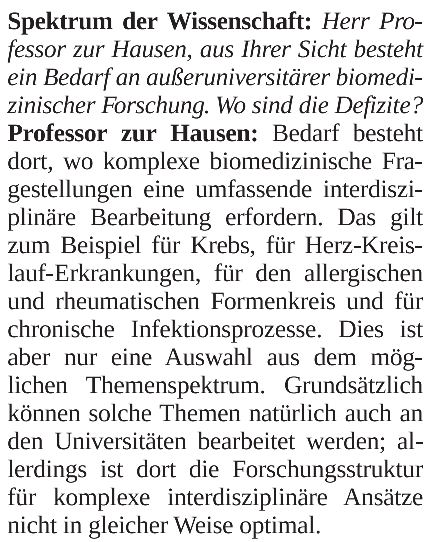
Einstellen muss sich der Hochschulbetrieb auf die Grundversorgung durch Bund und Länder. Doch während die Zahl der Studienabsolventen zwischen 1993 und 1998 jährlich durchschnittlich um 2,4 Prozent anwuchs, stiegen die Grundmittel jährlich – preisbereinigt – lediglich um 1,3 Prozent. Die Schere klafft immer weiter auseinander – besonders für Institute, die weniger als andere versiert sind in der Beschaffung von Drittmitteln. Hier kommt es zu Schieflagen.

SPEKTRUM INTERVIEW

Der Vorsitzende des Stiftungsvorstandes Deutsches Krebsforschungszentrum, Professor Dr. Harald zur Hausen, plädiert für eine Neustrukturierung der deutschen Gesundheitsforschung nach US-amerikanischem Vorbild. Dadurch soll die Effizienz steigen und das Defizit gegenüber dem schlagkräftigen System der National Institutes of Health beseitigt werden.

Harald zur Hausen

Brauchen wir ein deutsches National Institute of Health?



Spektrum der Wissenschaft: *Herr Professor zur Hausen, aus Ihrer Sicht besteht ein Bedarf an außeruniversitärer biomedizinischer Forschung. Wo sind die Defizite?*

Professor zur Hausen: Bedarf besteht dort, wo komplexe biomedizinische Fragestellungen eine umfassende interdisziplinäre Bearbeitung erfordern. Das gilt zum Beispiel für Krebs, für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, für den allergischen und rheumatischen Formenkreis und für chronische Infektionsprozesse. Dies ist aber nur eine Auswahl aus dem möglichen Themenspektrum. Grundsätzlich können solche Themen natürlich auch an den Universitäten bearbeitet werden; allerdings ist dort die Forschungsstruktur für komplexe interdisziplinäre Ansätze nicht in gleicher Weise optimal.

Spektrum: *Die Biomedizin rangierte in den Programmen der großen Forschungsorganisationen eher am Rande. Ist die Wahl des Neurologen Professor Dr. Karl Max Einhäupl zum Vorsitzenden des Wissenschaftsrats ein Zeichen, dass diese Fachrichtung künftig gestärkt wird?*

zur Hausen: Ich stimme Ihrer Aussage zu, dass die Biomedizin in den großen Forschungsorganisationen eher am Rande rangiert. Es fehlt eben eine einheitliche Struktur. Ebenso fehlt eine einheitliche Repräsentanz etwa in den europäischen Forschungsorganisationen. Ich würde mich freuen, wenn die Wahl des Neurologen Einhäupl sich auch als ein Signal erweist, die Biomedizin künftig gezielt weiterzuentwickeln.

Spektrum: *Sie fordern also einen Strukturwandel: Wie soll der aussehen?*

zur Hausen: Ich habe meine Vorstellung zum Strukturwandel sowohl dem Wissenschaftsrat als auch den zuständigen Ministerien vorgelegt. Danach sollten die Gesundheitsforschungs-Einrichtungen der Helmholtz- und der Leibniz-Gesellschaft unter einer einheitlichen Führung zusammengefasst werden. Deren Aufgabe wäre es, durch gezielte Neuberufungen auf eine thematische Fokussierung hinzuwirken, durch internationale Begutachtungen das Evaluationssystem zu vereinheitlichen und über einen Vernetzungsfond die Bearbeitung von Querschnittthemen anzuregen.

Dies würde sicherlich nicht – wie immer wieder argumentiert wird – zu einer „Versäulung“ des deutschen Forschungssystems führen, sondern der bereits bestehenden Versäulung entgegenwirken und ein eher flexibles Strukturelement schaffen. Ferner sollten die so zusammengeschlossenen Einrichtungen über spezielle Strukturen mit den umliegenden Universitätskliniken kooperieren oder sich direkt an der klinischen Forschung beteiligen.

Spektrum: *Wie kann dieser Plan einer neuen Struktur nach dem Vorbild der US-amerikanischen „National Institutes of Health“ konkret umgesetzt werden?*

zur Hausen: Hier bedarf es eines mutigen politischen Schrittes. Es müsste vor

Die neuen Bundesländer liegen bei der Einwerbung von Drittmitteln pro Lehrstuhl um mehr als 20 Prozent hinter den Kollegen aus den alten Bundesländern. Um einen fairen Ausgleich in der Mittelverteilung zu erzielen, empfiehlt der Wissenschaftsrat nachdrücklich eine Novellierung der Hochschulfinanzstatistik.

Evaluation: Die Leistungsbewertung der Hochschulen nach objektiven Qualitätskriterien durch die Blaue Liste hat sich bestens bewährt. „Wie jedermann nachvollziehen kann, der jemals vor irgendeinem Test oder Prüfverfahren stand", so Einhäupl, „ist allein schon dieser Druck ein Leistungsansporn. Häufig hat die Vorbereitung auf eine Evaluation schon einen wesentlichen Teil der zu erzielenden Effekte gebracht." Das Verfahren selbst ist also sinnvoll – ähnlich wie der TÜV fürs Auto. Und ebenso wie der TÜV kann der Wissenschaftsrat Institute aus dem Verkehr ziehen (lassen), indem die Förderung gestrichen wird. So können Mittel rationaler vergeben werden.

Claus M. Schmidt *ist Wissenschaftsjournalist in München.*

Hochschulbau: Im laufenden Jahr sind 4,3 Milliarden Mark für Gebäude und Großgeräte vorgesehen. Hier will Einhäupl auf Verwaltungsvereinfachung drängen und auf größere Entscheidungsfreiheiten der Bauherrn: „Nicht jedes Bauelement und jedes Trafohäuschen muss einzeln verhandelt werden." Bei künftigen Standortentscheidungen sollen verstärkt Leistungs- und Wettbewerbskomponenten eine Rolle spielen. Die Nachbarschaft zu außeruniversitären Einrichtungen der forschenden Industrie soll im Dienste engerer Verbindungen und stärkerer Praxisorientierung berücksichtigt werden. ■

allem ein Konsens zwischen dem Bund und den Sitzländern der betreffenden Einrichtungen hergestellt werden, der die Strukturfragen langfristig regelt. Erfolge dieser neuen Struktur sind nicht sehr kurzfristig zu erwarten. Vielmehr wird sich die Fokussierung der Einrichtungen erst mittelfristig einstellen können – vor allem bedingt durch eine Neuorientierung der Berufungspraxis.

Spektrum: *Können Sie anhand eines Beispiels schildern, wie die derzeitige Struktur an ihre Grenzen stößt und welche Vorteile Ihr Modell demgegenüber böte?*

zur Hausen: Die bestehende Struktur bringt der Gesundheitsforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft Nachteile – wie übrigens auch vielen anderen Einrichtungen dort. Alle sind von einer langfristigen pauschal verfügten 1,5-prozentigen Mittelsperre betroffen. Hingegen erfahren die Max-Planck-Gesellschaft und die Deutsche Forschungsgemeinschaft jährlich einen Zuwachs, der mehrere Prozentpunkte beträgt. Für die Institutionen der Helmholtz-Gemeinschaft ist es deshalb sehr schwer, neue Themen aufzugreifen oder neue Nachwuchsgruppen einzurichten, selbst wenn eine ganze Reihe der bisherigen Abteilungen geschlossen werden.

„Die Gesundheitsforschung muss sich thematisch fokussieren."

Die Begutachtungssysteme der Einrichtungen innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft – aber auch diejenigen der Leibniz-Institute – sind uneinheitlich und werden nicht unter den gleichen harten Sachkriterien durchgeführt. Die gegenwärtige Struktur erleichtert es, in verschiedenen Institutionen Forschergruppen einzurichten, die auf analogen Sachgebieten arbeiten. Schließlich hat die Gesundheitsforschung im deutschen Bereich ein sehr uneinheitliches Profil und ist im Rahmen der Europäischen Union und auch international nur in Einzelaspekten vertreten.

Spektrum: *Um Ihr Modell umsetzen zu können, müssen sehr viele Instanzen mitspielen. Werden da nicht viele Einrichtungen, die derzeit noch frei nebeneinander her forschen, versuchen, ihre Besitzstände und Entscheidungsfreiheit zu wahren?*

zur Hausen: Die Zahl der Instanzen, die hier mitspielen müssen, ist vergleichsweise gering. Im Wesentlichen sind Bund und Länder gefordert, die entsprechende Richtlinie zu erarbeiten. Den Kuratorien und Aufsichtsräten der betreffenden Einrichtungen würde dann die Aufgabe obliegen, ihre jetzige Struktur den projizierten Entwicklungen anzupassen. Nach einer Reihe von Vorgesprächen habe ich zumindest den Eindruck, dass die Leiter der gesundheitsforschenden Institute der Leibniz-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft diesem Konzept grundsätzlich positiv gegenüberstehen.

Spektrum: *Und wie sieht es mit den Kosten aus?*

zur Hausen: Ich erwarte durch die Vereinheitlichung des Gesundheitsforschungssystems keine Kostensteigerung. Querberufungen werden in deutlichem Umfang vermieden. Durch gemeinsame Einrichtungen wären sogar in manchen Bereichen – wie etwa der Tierhaltung, des Bibliothekswesens und der Bioinformatik – gewisse Einsparungen zu erzielen.

Spektrum: *Welche Hindernisse sind noch zu überwinden?*

zur Hausen: Wir sind von einer Lösung der hier angeschnittenen Frage offensichtlich noch weit entfernt. Für mich ist der politische Wille nicht erkennbar, den hier vorgetragenen Vorschlag umzusetzen, obwohl er – zumindest nach meiner Überzeugung – die Effizienz der deutschen Gesundheitsforschung deutlich steigern würde.

Spektrum: *Nach den ersten BSE-Fällen wurden sofort Millionen für die BSE-Forschung versprochen. Gesundheitsminister haben den Hut genommen. Das Ganze vermittelt nicht den Eindruck von Koordination. Hätte eine Organisationsstruktur nach US-amerikanischen Muster hier früher die Weichen stellen können?*

zur Hausen: BSE mag als Beispiel dienen, wie sehr gerade komplexe chronische Erkrankungen eine fokussierte, dabei aber interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordern. Hier handelt es sich um eine Infektionskrankheit, deren Epidemiologie weitgehend unerforscht ist, deren früheres sporadisches Auftreten in unseren Rinderbeständen aufgrund einer fehlenden umfassenden pathohistologischen Diagnostik unbekannt ist und für die wir dringend weitere empfindlichere Untersuchungsverfahren benötigen.

Da bei uns eine übergeordnete Koordinationsstelle – wie sie etwa der Präsident oder Senat eines „Deutschen Zentrums für Gesundheitsforschung" darstellen könnte – fehlt, wird dieser Krankheitskomplex voraussichtlich nicht das einzige Beispiel bleiben, wo wir in Deutschland den US-amerikanischen Aktivitäten hinterherhinken.

Das Interview führte Claus M. Schmidt, München.

„AUSGEZEICHNET“

LEIBNIZ-FÖRDERPREIS

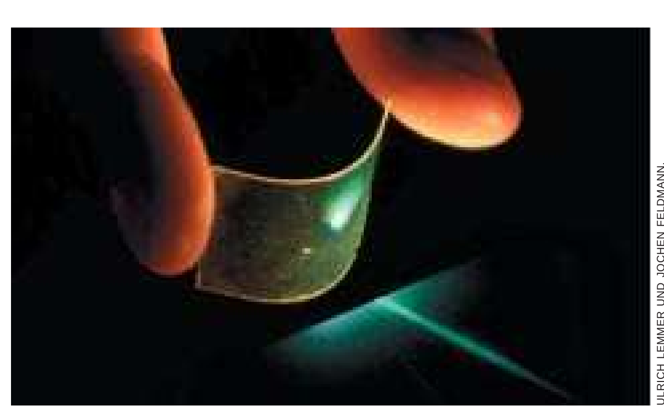
Laser aus Plastik

Die heute gebräuchlichen optoelektronischen Bauelemente wie Leuchtdioden (LEDs), Halbleiterlaser, Solarzellen und Fotodetektoren bestehen aus kristallinen anorganischen Materialien. Zusammen mit Glasfaserkabeln ermöglichen sie zum Beispiel die optische Übertragung sehr großer Datenmengen. Für eine Reihe von Anwendungen sind solche Bauelemente allerdings zu teuer und mechanisch zu unflexibel. Für innovative Produkte wie etwa aufrollbare Bildschirme suchen die Wissenschaftler deshalb nach weichen organischen Materialien mit geeigneten optischen und elektrischen Eigenschaften.

Entscheidende Erfolge bei der Entwicklung optoelektronischer Elemente aus organischen Substanzen hat in den letzten Jahren die Forschungsgruppe um **Jochen Feldmann** an der Ludwig-Maximilians-Universität München erzielt. Dieses Team konnte zum Beispiel den weltweit ersten mechanisch flexiblen Plastiklaser realisieren (SdW 10/99, S. 12). Mit Hilfe einer der Natur abgeschauten Präparationstechnik konnten zudem großflächige Fotodetektoren mit erstaunlich guten Kenndaten hergestellt werden.

Gegenwärtig sucht die Münchner Gruppe auch die Vorteile von anorganischen und organischen Materialien zu verbinden – etwa indem winzige Kristalle aus Halbleitern oder Metallen in eine weiche Polymerhülle gepackt werden. Dabei ist es erstmals gelungen, einzelne metallische Nanopartikel optisch zu vermessen und die Einflüsse der direkten festen oder flüssigen Umgebung zu untersuchen. Aus diesen für die physikalische Grundlagenforschung wichtigen Experimenten hat sich mittlerweile eine Reihe sehr anwendungsnaher Projekte herauskristallisiert, in denen versucht wird, die Metallpartikel als winzige optische Sensoren für biochemische Reaktionen oder als optische Nanoschalter einzusetzen.

Um die wegweisenden Forschungsarbeiten zu unterstützen, hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft Jochen Feldmann einen der diesjährigen Förderpreise des Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Programms in Höhe von drei Millionen Mark zugesprochen.



ULRICH LEMMER UND JOCHEN FELDMANN, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Eine biegsame Polymerfolie emittiert grüne Laserstrahlung.

LANDESFORSCHUNGSPREIS BADEN-WÜRTTEMBERG

Antike Graffiti als Quellen der Altertumsforschung

Wer sich heute gedanklich auf eine Reise in die griechische Vergangenheit begibt, kann auf einen reichhaltigen wissenschaftlichen Fundus zurückgreifen. Die Analyse literarischer Quellen ist weit fortgeschritten, weil diese Texte seit langem bekannt sind. Jedes Jahr werden mehrere hundert Inschriften bei Ausgrabungen entdeckt – eine willkommene neue Quelle für die Wissenschaft. Meist handelt es sich um kurze Textstücke wie Grabinschriften, Verträge oder Beschlüsse.

Solche Funde sind ein Spezialgebiet des Altertumsforschers **Angelos Chaniotis** von der Universität Heidelberg. Fragestellungen und Forschungsmethoden sucht er nicht nur innerhalb der Altertumswissenschaften, sondern mit einem Disziplin übergreifenden Ansatz auch in den modernen Kultur- und Sozialwissenschaften. Textstücke, die für manche seiner Kollegen uninteressant erscheinen, vermag er dadurch in einem neuen Zusammenhang zu sehen. Regelmäßig begleitet er dazu Ausgrabungen in Aphrodisias in der heutigen Türkei.



ANGELOS CHANIOTIS

Griechische und jüdische Graffiti im spätantiken Aphrodisias (Kleinasien) stellen wichtige Zeugnisse für den Alltag und die Religion der Spätantike dar.

Ein Beispiel für den Erfolg der Interpretationen von Chaniotis, der sich vor allem für die Randgebiete der griechischen Welt interessiert, ist die Entdeckung der Stadt Syneta. Mit Hilfe einer Zeile einer Inschrift war es ihm gelungen, die Verbindung zwischen dem Namen eines Gottes und dem bislang unbekannten Ort herzustellen. Weitere Entdeckungen in Aphrodisias waren zahlreiche Graffiti, die von den alten Griechen und Römern an die Wände gezeichnet wurden. Auch sie geben interessante Hinweise auf die Denkweise der Menschen in der damaligen Zeit.

Unter anderem fanden die Forscher in der Türkei jüdische Darstellungen, zum Teil überdeckt von christlichen. Anlass für Chaniotis, die religiösen Auseinandersetzungen, aber auch den Dialog zwischen Christen, Juden und Heiden im 4. Jahrhundert n. Chr. zu rekonstruieren. Durch das Studium von Inschriften stieß Chaniotis auch auf ein bis dahin unbekanntes Phänomen der griechischen Antike: auf das der „wandernden Historiker“. Das waren beruflich spezialisierte Gelehrte, die von Stadt zu Stadt zogen und dort Vorträge hielten. Doch die Ehrungen, die in den Inschriften überliefert sind, erhielten sie nicht dafür, dass sie die wahre Geschichte erzählt hätten, sondern für ihre freundschaftliche Gesinnung gegenüber der Stadt. Sie waren also so genannte „Lobhistoriker“. Ihre Tätigkeit scheint die bevorzugte Form der Geschichtsschreibung in jener Zeit zu repräsentieren.

Professor Chaniotis zählt zu den diesjährigen Preisträgern des Landesforschungspreises Baden-Württemberg. Die damit verbundene Dotierung ermöglicht es den Ausgezeichneten, ein Forschungsvorhaben ihrer Wahl umzusetzen. ■



Sicheres Auto mit flüssiger Luft als Antrieb

Zunächst sollte man meinen, dass ein mit flüssiger Luft betriebener Motor keineswegs etwas ganz Ausserordentliches sein müsste, da Maschinen mit comprimirter Luft eigentlich etwas ganz Aehnliches wären. Ihre Schwierigkeit besteht aber darin, dass die flüssige Luft ... schon bei weit über 100 Grad unter dem Nullpunkt siedet. ... Ein Mensch, der sich einem mit flüssiger Luft betriebenen Gefährt anvertraute, müsste jeden Augenblick darauf gefasst sein, mitsammt den Trümmern des Wagens und wahrscheinlich selbst stark lädirt in die Lüfte geschleudert zu werden. ... Die grosse technische Schwierigkeit scheint jetzt überwunden zu sein, wenigstens wird von dem in Newyork ausgestellten neuen Gefährt angegeben, dass es eine Strecke von 80 Kilometern ... zurücklegen kann, ohne seine Insassen zu gefährden. *(Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie, VII. Jg., Nr. 10, S. 285)*



Gefährt mit Flüssigluftantrieb

Kein Föhn aus der Sahara

Wegen der hohen Wärme und Trockenheit des Föhns hat man anfangs die Ursprungsstätte desselben in der Sahara gesucht. Eine eingehendere Untersuchung ... hat aber gezeigt, daß derselbe unmöglich aus der Sahara kommen kann. Denn während auf der Nordseite der Alpen der heiße, trockene Südwind weht, ist die Luft auf der Südseite ruhig, die Temperatur ist in den Thälern wenig oder gar nicht erhöht, die relative Feuchtigkeit ist groß und gewöhnlich fallen wenige Stunden, nachdem der Föhn in den nördlichen Alpenthälern zu wehen begonnen hat, auf der Südseite des Alpenkammes ... Niederschläge. *(Der Stein der Weisen, 26. Bd., 1901, S. 255)*

Altägyptisches Platin

Von diesem erst seit anderthalb Jahrhunderten bekannt gewordenen Edelmetalle hat Berthelot ... ein 5 bis 6 mg schweres Stückchen an einem zu Theben gefundenen ... Metall-Etui entdeckt, mit dem die Königin Shapenapit, Tochter des Königs Psammetik I. (7. Jahrhundert vor Christus) ein Geschenk gemacht hat. ... Was aber das an ihm gefundene Platin betrifft, dessen Natur nach seinem chemischen Verhalten festgestellt wurde und zwar als ein mehrere verwandte Metalle enthaltendes Rohplatin, so haben die antiken Goldschmiede dessen Eigenart ersichtlich nicht erkannt gehabt, sondern es nach seiner Farbe für Silber gehalten und ihm, ebenso wie dem natürlichen Waschgolde, unter dem Hammer Blättchenform ertheilt. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, XVI. Bd., Nr. 21, S. 238)*



Rätselhafte Protuberanzen

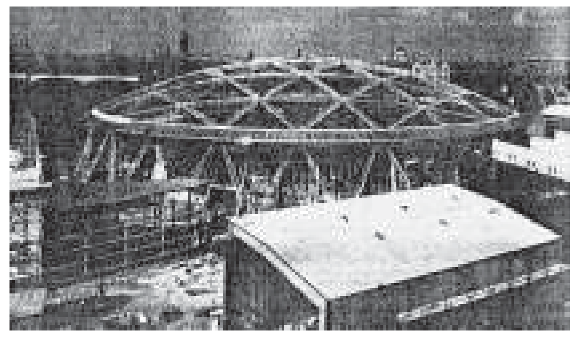
Einer Klärung nähergeführt wurde das Rätsel der Sonnenprotuberanzen, jener wie rot leuchtenden Flammen aus der Sonnenchromosphäre herausschießenden Gasmassen, die eine Höhe von 400 000 km über die Sonne erreichen können. Nach den Darlegungen von Prof. Günther, Göttingen, ist die emporschießende, hauptsächlich aus einem Gemisch von Helium, Wasserstoff und Kalzium bestehende Materie gewisser Protuberanzen an ganz bestimmte, im Raum festliegende Bahnen gebunden und zwar, offenbar in Abhängigkeit zum Magnetismus der Sonne, an magnetische Feldlinien. *(Universitas, 6. Jg., Heft 5, S. 592)*

Transplantation des Zellkerns

Es ist gelungen, bei zwei Amöbenarten (*Amoeba proteus* und *A. discoides*) den Kern operativ zu entfernen und durch den Kern der anderen Amöbenart zu ersetzen. Die Operation gelang in einem recht hohen Ausmaß: Bei Wiedereinpflanzung der Kerne der gleichen Art zu etwa 90%, bei Übertragung der Kerne der andern Art zu etwa 80%. ... Bei der Transplantation nahmen die fremden Kerne die Größe der eigentlich zu dem Plasma gehörenden Zellkerne an, das heißt, das Plasma entscheidet über die Größe der Kerne. Auf der anderen Seite unterscheiden sich die beiden Amöbenarten auch in der Form der Zellen während der Bewegung. ... Der Vergleich der reziproken Transplantate ... zeigte hier deutlich, daß die Form der Amöbe teils vom Kern, teils vom Plasma bestimmt wird. *(Umschau, 51. Jg., Heft 10, S. 311)*

Vorfahr des Millenium Dome in Großbritannien

Mit der großen nationalen Veranstaltung, zu der als „Festival of Britain" vom Mai bis Oktober 1951 in London die Leistungen der britischen Forscher und Entdecker zusammengetragen sind, wird zugleich eines der interessantesten Baudenkmäler der Neuzeit der Öffentlichkeit übergeben. Der „Dome of Discovery" übertrifft in seinen Ausmaßen nicht nur alle bisher fertiggestellten Kuppelbauten, sondern ist zugleich das bedeutendste Leichtmetallbauwerk, das jemals errichtet wurde. Mit einem Durchmesser von 111 Metern ... überdeckt die freitragende, 27,5 Meter hohe Kuppel eine Fläche von 10 000 Quadratmetern! Damit wird fast die Fläche der größten Halle des Kontinents in freitragender Stahlkonstruktion erreicht, die auf dem Messegelände in Hannover errichtet wurde. *(Orion, 6. Jg., Nr. 9, S. 346)*



Der größte Kuppelbau: Englands „Dome of Discovery"

ZOOLOGIE

Peter-Matthias Gaede (Hg.)

Die Gesellschaft der Tiere

Von Tieren und Menschen

Gruner & Jahr, Hamburg 2000. 264 Seiten, DM 98,–

Auf den ersten Blick sieht das Buch aus wie eine Sammlung künstlerisch wertvoller Bilder und einiger Texte. Ob kuschelnde Affen, raufende Gepardinnen oder aus dem Ei schlüpfende Kraken in Nahaufnahme – die Gesellschaft der Tiere fasziniert immer wieder. Nichts für zarte Gemüter sind der Text von Jared Diamond über Kannibalen („Warum beerdigen Sie Ihre lieben Verstorbenen eigentlich, statt sie zu essen?"), das Bild vom auf dem Teller angerichteten Gorillakopf oder die Tigerbisslöcher im skalpierten Schädel eines Menschen.

Erst wer das Buch von vorne nach hinten durchsieht und die vier begleitenden Texte liest, erkennt die packende Story. 230 Fotografien aus den besten GEO-Reportagen der vergangenen Jahre erzählen von der Beziehung zwischen Tier und Mensch: von der Schönheit der Kreatur, vom Fressen und Gefressenwerden, vom Tiere liebenden und quälenden Menschen – und von Augenblicken, die einfach Spaß machen, weil uns die Tiere an allzu Menschliches erinnern und man feststellt: Die sind ja wie wir.

Friederike Bleckmann

Die Rezensentin ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Stockdorf bei München.

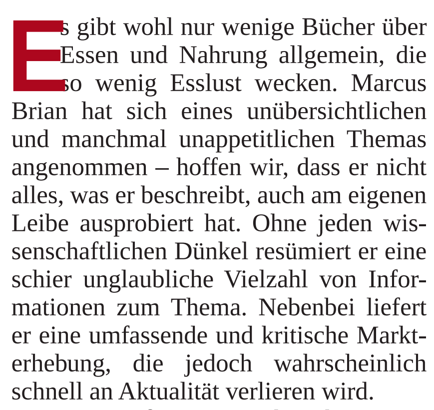
Das Braune Langohr, eine auch in Mitteleuropa heimische Fledermaus-Art, schlürft Wasser im Tiefflug.

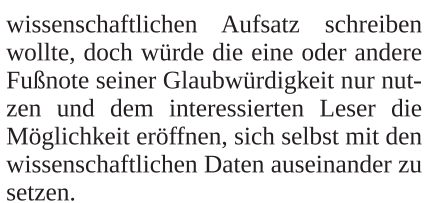
BRAUNE LANGOHR-FLEDERMAUS: DIETMAR NILL / GEO; SCHÜTZENFISCH: KIM TAYLOR / GEO



Mit einem gezielten Wasserstrahl holt sich der Schützenfisch eine Spinne vom Blatt.

ERNÄHRUNG





Marcus Brian

Essen auf Rezept

Wie Functional Food unsere Ernährung verändert

Hirzel, Stuttgart 2000. 174 Seiten, DM 38,–

Es gibt wohl nur wenige Bücher über Essen und Nahrung allgemein, die so wenig Esslust wecken. Marcus Brian hat sich eines unübersichtlichen und manchmal unappetitlichen Themas angenommen – hoffen wir, dass er nicht alles, was er beschreibt, auch am eigenen Leibe ausprobiert hat. Ohne jeden wissenschaftlichen Dünkel resümiert er eine schier unglaubliche Vielzahl von Informationen zum Thema. Nebenbei liefert er eine umfassende und kritische Markterhebung, die jedoch wahrscheinlich schnell an Aktualität verlieren wird.

Seine größte Leistung besteht in einer im Verlauf des Buchs immer klarer werdenden Entzauberung des vorgeblichen Gütesiegels „Functional Food“, das Lebensmittel mit Zusatznutzen deklarieren soll. Darunter Joghurts mit speziellen Kulturen, bestimmte „gute“ Fettsäuren, Wellness- und Energydrinks und natürlich mit allen möglichen Vitaminen, Ballast- und Pflanzenstoffen angereicherte Nahrung. Verständlich und anschaulich führt das Buch durch das Dickicht von Werbung, Produkten und Versprechungen. Brian, der – wie uns der Klappentext verrät – von seinen Kollegen vom Magazin Öko-Test wegen seiner Kochkünste hoch geschätzt wird, nahm die Versprechungen der Hersteller unter die Lupe, untersuchte, was man von den neuen Produkten wirklich erwarten kann, und beschreibt deren Risiken und Nebenwirkungen.

Nahrungsmittelproduzenten versprechen uns als Effekte solch funktioneller Kost Schutz vor Herzinfarkt oder Krebs, ein wachsames Immunsystem und verbesserten Geschmack. Die Rechtslage bei uns ist diffus, anders als beispielsweise in Japan, weil eindeutige Abgrenzungen fehlen, denn solche Produkte nehmen in der Regel eine Position im gesetzlichen Niemandsland zwischen Lebens- und Arzneimittel ein. Ein Nahrungsmittel ist demnach dann als funktionell anzusehen, wenn es über seinen Nährwert hinaus eine oder mehrere Körperfunktionen positiv beeinflusst. Das darf jedoch nicht als Verkaufsargument herangezogen werden, da es ansonsten unter das Arzneimittelgesetz fallen und nur nach einem aufwändigen Zulassungsverfahren auf den Markt gelangen würde.

Brian lässt seine Leser nicht lange im Unklaren, welche Meinung er gegenüber der „funktionellen“ Kost vertritt. Bei den Nahrungsmitteln mit eingebautem Mehrwert handele es sich um bloße Hirngespinste, von der Lebensmittel-Branche erdacht, um den Verbrauchern das Geld aus der Tasche zu ziehen: „Funktionelle Lebensmittel sind überall und nirgends.“ Ein Apfel sei durchaus funktionell und berge auch weit mehr als seinen reinen Nährwert. „Salzstangen und Cola sind … funktionell, wenn sie als Hausmittel gegen Durchfall verspeist werden. Ebenso … ein Kaffee, den man morgens gegen einen schlappen Kreislauf trinkt.“

Viele seiner Feststellungen belegt Brian anhand anschaulicher Beispielrechnungen, die deutlich entlarven, wie scharf die Produzenten mit ihren Werbeversprechen oftmals an den Legalitätsgrenzen entlangschrammen. Leider kann er dabei nur selten seine Häme unterdrücken und gerät dadurch in Gefahr, für unsachlich gehalten zu werden. Dieser Eindruck wird dadurch verstärkt, dass er die allerwenigsten der zahlreichen ins Feld geführten Untersuchungen mit ergiebigen Quellenangaben versieht. Man mag ihm zugute halten, dass er keinen wissenschaftlichen Aufsatz schreiben wollte, doch würde die eine oder andere Fußnote seiner Glaubwürdigkeit nur nutzen und dem interessierten Leser die Möglichkeit eröffnen, sich selbst mit den wissenschaftlichen Daten auseinander zu setzen.

Brian hat versucht, das nicht gerade unterhaltsame Thema sprachlich aufzupeppen, ist dabei aber weit übers Ziel hinausgeschossen. Seine vermeintlich scherzhaft-ironischen Kommentare gingen zumindest mir schon nach ein paar Seiten gehörig auf die Nerven, außerdem lenken sie von den Tatsachen ab und erwecken bald den Eindruck, dass hier Stimmung gemacht werden soll – kein guter Boden für eine kritische und differenzierte Auseinandersetzung. Das Buch will mit seinen augenzwinkernden Vorspännen zu jedem Kapitel und seiner ganzen Gestaltung einen romanartigen Eindruck erwecken, den Ratgeber zu einem Lesestück aufwerten, das er nun wirklich nicht ist und auch nicht sein sollte. Auch noch lästig: Einige Informationen werden wiederholt, teilweise mehrfach. Das mag vielleicht hilfreich sein für „Quereinsteiger“, tut aber meines Erachtens bei einem 180-Seiten-Bändchen wirklich nicht Not.

Wohl bekomm' s.

Hanno Charisius

Der Rezensent ist Molekularbiologe und Wissenschaftsjournalist in München.

PHILOSOPHIE





Jürgen Mittelstraß (Hg.)

Die Zukunft des Wissens

XVIII. Deutscher Kongress für Philosophie

Akademie Verlag, Berlin 2000. 566 Seiten, DM 198,–

Kaum ein Vorurteil über die Philosophie hält sich hartnäckiger als die Annahme, Philosophen säßen im Elfenbeinturm und spielten dort selbsterfundene Glasperlenspiele. Dabei ist es seit Hegel ein zentrales Anliegen der Philosophie, ihre jeweilige Gegenwart gedanklich zu durchdringen und begrifflich zu erfassen. Diese Hinwendung zu Gegenwartsfragen ist auch in einer Vielzahl von Vorträgen dieses Kongresses zu registrieren, der vom 4. bis 8. Oktober 1999 in Konstanz stattfand – um den Preis, dass Beiträge zur Philosophiegeschichte und zur Logik keine Aufnahme in diesen Tagungsband gefunden haben. Kaum einem Vortrag wird man vorwerfen können, er sei in einer unverständlichen Fachsprache abgefasst. Einige Vorträge verdienen besondere Erwähnung.

Peter Janich (Marburg) zeigt, dass die gegenwärtig einflussreichen Theorien der Informationsübermittlung, die zumeist auf Sender-Empfänger-Modellen beruhen, das Wesen dialogischer Kommunikation verfehlen und, entgegen ihrem Anschein, kausalistisch und monologisch sind. Diese Einsicht bewahrt einen vor der verbreiteten Verwechslung von erfolgreicher Informationsübermittlung mit gelingender Kommunikation – angesichts der voranschreitenden Technisierung von Kommunikation eine Korrektur von lebenspraktischer Bedeutung.

Bemerkenswert an den Beiträgen des Kolloquiums „Von der Arbeits- zur Wis- ▶

(Seiten 100, 101 und 102: Anzeige und Beihefter)

sensgesellschaft“ ist, dass sowohl Klaus Kornwachs (Cottbus) als auch Friedrich Kambartel (Frankfurt am Main) für eine Rückkehr in die von Karl Marx ausgehende Traditionslinie der politischen Ökonomie plädieren. Kambartel demonstriert exemplarisch das normativ-kritische Potenzial begrifflicher Analyse. Er wendet sich energisch gegen den Slogan, „der Gesellschaft gehe die Arbeit aus“; vielmehr entwickelt er einen Begriff der Arbeit, mit dem sich schließen lässt, dass eine Gesellschaft, in der es zugleich ein Heer von Arbeitslosen und einen latenten, arbeitswirksamen Bedarf gibt, „ökonomisch … falsch eingestellt ist“. Daraus ergibt sich ein konkreter, neokeynesianischer Handlungsvorschlag, der auf die Erzeugung eines „für öffentliche Institutionen verfügbaren arbeitswirksam einsetzbaren … Geldvolumens“ hinausläuft. Da ein solcher Vorschlag in klarem Widerspruch zur gegenwärtig dominanten neoklassischen Ökonomik steht, eröffnet Kambartel damit zugleich eine ernsthafte philosophische Debatte über die Grenzen dieser Theorie.

Die Beiträge des Kolloquiums „Wirtschaftsethik“ befassen sich mit ähnlich aktuellen Fragen. Peter Koslowski (Hannover) zeigt die Genese des *Shareholder-Value*-Prinzips auf: Von reinen Finanzunternehmen, in denen es seine Berechtigung habe, sei es auf Industrieunternehmen übertragen und ausgeweitet worden, gerate dort mit den übrigen Zielen solcher Unternehmen in Konflikt und lenke zudem die Interessen des Managements in falsche Richtungen, etwa auf spekulative Unternehmungen oder strategische Übernahmen. Dagegen setzt Koslowski eine aristotelische Auffassung vom Wesenszweck einer Firma, nämlich die „Produktion optimaler Güter“.

Nach der Auffassung von Lee Tavis vom Notre Dame College of Ohio dient ein vereinseitigtes *Shareholder-Value*-Prinzip Ökonomen, die in einfachen Mittel-Zweck-Beziehungen denken, als bequeme Handhabe, alle sonstigen Belange diesem Ziel unterzuordnen, und ist insofern eine moralisch fragwürdige Reduktion sozialer Komplexität. Es liegt kein Argument vor, mit dem man die faktische Affinität zwischen ökonomischer Globalisierung und *Shareholder-Value*-Prinzip normativ begründen könnte.

Aus dem Bereich der anwendungsorientierten Ethik sind die Vorträge von Angelika Krebs (Frankfurt am Main) und Dieter Birnbacher (Düsseldorf) hervorzuheben, da sie moralische Alltagsintuitionen auf eine harte Probe stellen. Krebs setzt gegen die allgemein vertretenen komparativen Standards („Mitglieder zukünftiger Generationen sollen es durchschnittlich nicht schlechter haben als wir“) absolute Standards, die von uns lediglich verlangen, zukünftigen Personen die materiellen Bedingungen eines guten Lebens zu hinterlassen. Diese Position setzt voraus, dass man einen moralischen Eigenwert von Gleichheit bestreitet. Eine derart anti-egalitaristische Zukunftsethik erlaubt es, „weniger [zu] hinterlassen, als wir selbst erhalten haben, und uns ein schönes Leben [zu] machen“. Wer das nicht akzeptieren möchte, muss Argumente zu Gunsten des Egalitarismus verteidigen, die Krebs allesamt für wenig überzeugend hält. Durch ihren im besten Sinne provozierenden Vortrag hat sie eine Diskussion über die ethische Haltbarkeit egalitaristischer Intuitionen eröffnet, der man auch außerhalb des Problemkreises der Zukunftsverantwortung nicht wird ausweichen können.

Gegen das Töten lässt der Utilitarist nur indirekte Argumente gelten

Birnbacher behandelt die brisante Frage nach der moralischen Zulässigkeit der pränatalen Selektion von Nachkommen auf Grund bestimmter (un)erwünschter Merkmale. Was Eltern zu einer derartigen Selektion motivieren könnte, muss für ihn nicht begründet werden. Präferenzen oder „Minderschätzungen“ seien nicht schon deshalb moralisch unstatthaft, weil sie „konformistisch, unaufgeklärt oder illusionär“ seien. Einwände der Art, nur weil ein Merkmal eines Embryos den Eltern nicht gefalle, dürfe man ihn nicht töten, würde Birnbacher als Utilitarist zurückweisen, da er Menschen ein starkes Lebensrecht erst nach der Geburt zuerkennt.

Die Erfüllung vorhandener Präferenzen ungeachtet ihrer moralischen Qualität sei wichtiger als der Respekt vor potenziellen Personen. Die Tötung von Nicht-Geborenen sei statthaft, da ein ungeborenes Kind noch „ohne Bewusstsein von Leben und Tod [ist] und deshalb den ihm im Zuge der Selektion auferlegten Tod nicht fürchten kann“. Diese – von vielen für skandalös erachtete – Position gründet darin, dass der Utilitarismus nur indirekte Argumente gegen das Töten anerkennen kann. Gegen die technisch immer näher rückende Selektionspraxis lässt Birnbacher allein das Kränkungs-Argument gelten, das besagt, dass sich lebende Träger eines Merkmals, das selegiert wird, gekränkt fühlen könnten. Die utilitaristische Ethik erkennt eben ▶

keine absoluten normativen Grenzen an, wenn deren Verletzung einen Zugewinn an Präferenzerfüllung oder Interessenbefriedigung („Glück") verspricht.

Als philosophisch weiterführend könnte sich Wolfgang Spohns (Konstanz) beeindruckender Vorstoß ins „All der Gründe" erweisen. Spohns Ansatz scheint es zu erlauben, philosophische Grundprobleme (Schein und Sein, Apriorität, Kohärenz, Wahrheit, Essenzen) auf argumentationstheoretischer Basis zu reformulieren. Spohn weckt große Neugierde auf den von ihm angekündigten „bedächtigen und umsichtigen Nachvollzug" seiner „tour de force".

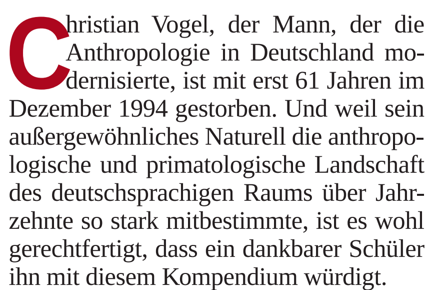
Die Bedeutung des Argumentierens könnte ungeachtet aller Bekenntnisse zum „Diskurs" in Zukunft schwinden. Wolfram Hogrebe (Bonn) sieht gegenwärtig eine zunehmende Überlagerung von Sprache durch immer trivialere Bilderwelten. „Dieses Jahrhundert begann mit Bewusstsein, verausgabte sich an die Sprache und endet im Bild." Diese Visualisierungen seien Teil einer „kollektiven Infantilisierung", für die sich im Alltag und in den Medien reichlich Belege finden. Hogrebe setzt auf die Widerstandspotenziale autonomer Kunst.

Auch der Philosophie kommt die Aufgabe zu, der Unterordnung diskursiver Rationalität unter beliebig herstellbare Bilderwelten zu widerstehen. Wie viele Verbündete sie hierbei noch findet, bleibt abzuwarten.

Konrad Ott

Der Rezensent ist Philosoph und Professor für Umweltethik am Botanischen Institut der Universität Greifswald.

ANTHROPOLOGIE



Christian Vogel

Anthropologische Spuren

Zur Natur des Menschen

Herausgegeben von Volker Sommer
Hirzel, Stuttgart 2000. 256 Seiten, DM 68,–



Christian Vogel, der Mann, der die Anthropologie in Deutschland modernisierte, ist mit erst 61 Jahren im Dezember 1994 gestorben. Und weil sein außergewöhnliches Naturell die anthropologische und primatologische Landschaft des deutschsprachigen Raums über Jahrzehnte so stark mitbestimmte, ist es wohl gerechtfertigt, dass ein dankbarer Schüler ihn mit diesem Kompendium würdigt.

Die Kapitel des Buches repräsentieren Stationen einer lebenslangen Forschungslinie. Mit einem biologischen Rätsel fing es in Studentenzeiten an: Wie beispielsweise kann eine komplexe Musterung auf den Flügeln eines Eichelhähers über die Einzelontogenese jeder Feder entstehen? Wie kann ein komplexes Ganzes aus einfacheren Teilen allmählich heranwachsen, wo doch die Zwischenstufen keinerlei Überlebensvorteil bieten? Ein bisschen aufrechter Gang bringt dem Menschen nichts. Die Flosse des Schiffshalters ist zum Saugnapf umfunktioniert und taugt nicht mehr zum Schwimmen; wie überlebt ein Tier mit einem Organ, das nicht mehr Flosse und noch nicht Saugnapf ist?

Daraus entwickelte sich die Kernfrage der Tiersoziologie (und auch der Soziologie des Menschen): Wie kann aus der Interessenlage von Individuen eine übergeordnete Gemeinschaft entstehen? Wie wird Egoismus überwunden und gar zum Altruismus? Beispiele für Letzteres gibt es in der Tierwelt zuhauf: In Insektenstaaten verzichten sämtliche Angehörigen gewisser Kasten auf die Reproduktion; ein Tier, das einen Warnruf ausstößt, mag zwar andere retten, gefährdet aber sich selbst.

Bis Anfang der siebziger Jahre schien gleichwohl die Welt in Ordnung. Soziale Strukturen im Tierreich, so die herrschende Auffassung, dienen vielleicht nicht der Reproduktion des Individuums, aber doch der Arterhaltung.

Doch manches beobachtete Verhalten war noch nicht einmal der Art dienlich – ganz im Gegenteil. Die Vertreter der alten Schule, deren prominenteste Figur Konrad Lorenz war, begnügten sich damit, solches Verhalten als aberrant zu deklarieren oder ihm eben doch eine arterhaltende Funktion zuzuweisen. Wenn Tiere der gleichen Art einander beschädigten oder gar umbrachten, musste das als harter Regulationsmechanismus dazu dienen, der Art oder der Gruppe das Überleben zu sichern, indem es Überbevölkerung verhinderte.

Kindermord bei Tieren ist zweifelsfrei dokumentiert

Doch Anfang der siebziger Jahre beobachtete Vogel bei den Grauen Languren Indiens, dass erwachsene Männchen Jungtiere töteten, Angehörige nicht nur ihrer Art, sondern sogar Mitglieder ihrer eigenen Gruppe. Nahrungsmangel oder drohende Überbevölkerung kam angesichts der ökologischen Verhältnisse nicht als Erklärung in Betracht.

Als einer der ersten im deutschen Sprachraum erkannte Vogel die Bedeutung des Infantizids. Mit dieser blutigen Methode maximieren Paschas, die soeben einen neuen Harem übernommen haben, ihren persönlichen Fortpflanzungserfolg. Ein Langurenweibchen, das Junge säugt, ist nicht empfängnisbereit und aus Sicht der egoistischen Gene des Paschas totes Kapital. Erst nach dem Tod des Säuglings setzt der weibliche Zyklus wieder ein.

Der serielle Kindermord in Langurengesellschaften war jedoch damals noch so spärlich dokumentiert, dass Vogel sich mit seiner Auffassung im Kreis der etablierten Fachkollegen fast blamierte. Mutig stand er dennoch dazu, und mit dem erwachten Interesse der Fachwelt wurde der Infantizid immer häufiger und bei den verschiedensten Tierstämmen zuverlässig beobachtet und durch Fotografie und Filmaufnahmen belegt. Sehr zur Überraschung der Biologen stießen dann auch Anthropologen und Soziologen auf durchaus vergleichbare Phänomene in menschlichen Gesellschaften. Bei den Yanomami-Indianern und bis ins 19. Jahrhundert bei den Bauern von Krummhörn (Ostfriesland) scheint der Egoismus der Gene massiven Einfluß auf die Überlebenschancen Neugeborener auszuüben (Spektrum der Wissenschaft 6/1995, S. 70), wie es im Kapitel über Evolution und Moral durch eindrückliche Zahlen belegt wird.

Vogels beharrliches Verfechten seiner Theorien brachte die entscheidende Wende in der Biologie, die der Soziobiologie bei uns ganz entscheidend den Weg bereitete. Ein Triumph, der Vogels späteren Aufsätzen deutlich anzumerken ist. So, wenn er sich im letzten Kapitel „leichtfertig", wie er selbst sagt, an Goethes „Faust" wagt, höchst vergnüglich, aber schlüssig die „Soziobiologie der Gretchen-Tragödie" untersucht und im Egoismus der Gene „des Pudels Kern" entdeckt.

Claus M. Schmidt

Der Rezensent ist Diplombiologe und Leiter des Wissenschaftsressorts im Münchner Medienbüro Correspondence.

MATHEMATIKGESCHICHTE



Christoph J. Scriba und Peter Schreiber

5000 Jahre Geometrie

Geschichte, Kulturen, Menschen

Springer, Berlin 2001. 610 Seiten, DM 69,–

Die Projektgruppe „Geschichte der Mathematik“ an der Universität Hildesheim gibt eine Buchreihe heraus mit einem anspruchsvollen Ziel: „die Entwicklung der wichtigsten Teilgebiete der Mathematik von ihren Anfängen bis in unsere Tage [zu behandeln], eingebettet in die Kulturgeschichte der verschiedenen Epochen und Zonen unserer Erde und dargestellt in einer zum Selbststudium und als Material zum Fernstudium geeigneten Weise“.

Der erste Band der Reihe, „Vom Zählstein zum Computer“ (Franzbecker, Hildesheim 1997), enthält eine sehr gedrängte Übersicht zur Geschichte der Mathematik von Hans Wußing (rund 60 Seiten) sowie 50 kurze Mathematikerbiografien, dazu Tafeln und Karten.

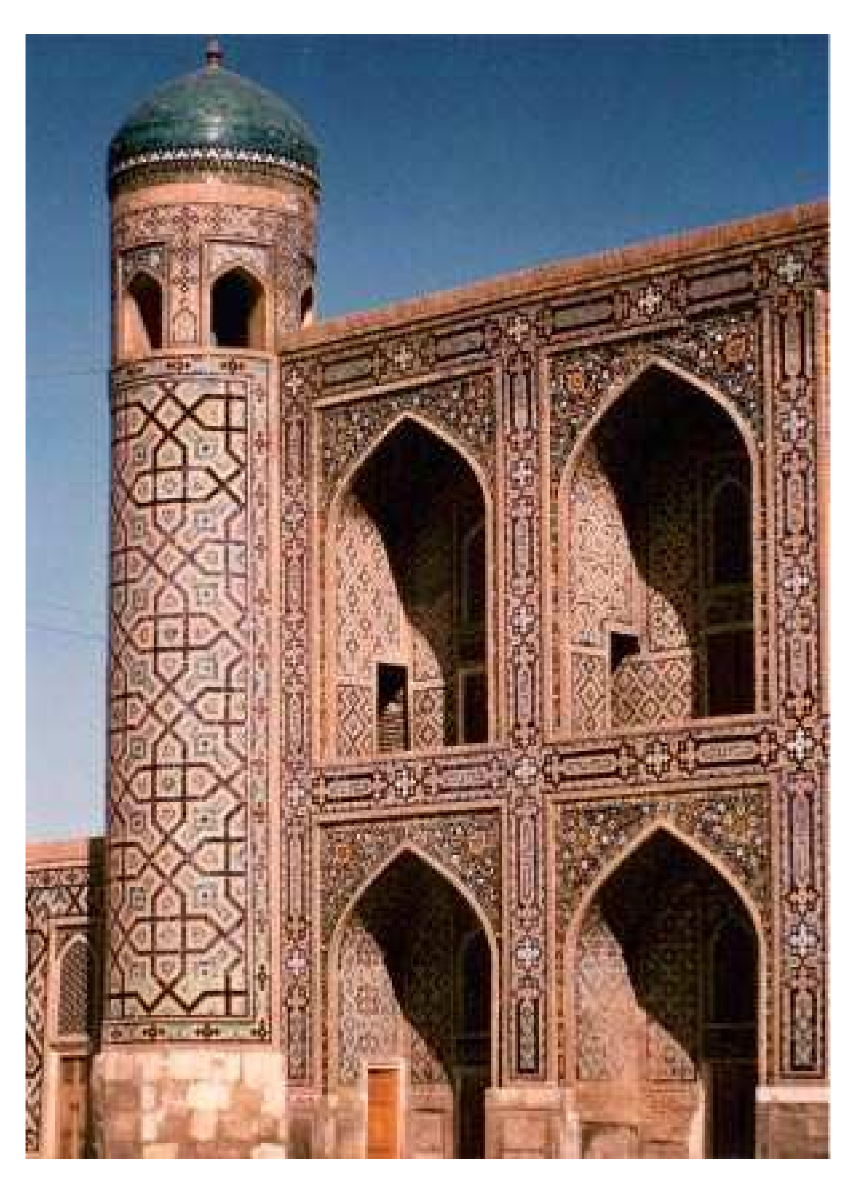
Der nun vorliegende zweite Band zur Geschichte der Geometrie füllt eine Lücke in der deutschsprachigen Literatur; denn abgesehen von Spezialuntersuchungen wie Johannes Tropfkes unübertroffener, aber leider nicht neu bearbeiteter „Geschichte der Elementarmathematik“ Band 4 (Berlin 1940) gibt es bislang nur die eher summarische „Geschichte der Geometrie“ von Klaus Mainzer (Mannheim 1980).

Das Werk enthält neun Kapitel, die im Wesentlichen chronologisch geordnet von den Anfängen in vorgriechischer Zeit (Babylon, Ägypten) über die klassische Geometrie der Griechen und das europäische Mittelalter bis in die Gegenwart fortschreiten. Der Hamburger Mathematikhistoriker Christoph Scriba hat die „alte“ und die „außereuropäische“ Geometrie bearbeitet, während der Greifswalder Mathematiker Peter Schreiber für die „neuere“ Geometrie verantwortlich zeichnet.

Ergänzt wird der Text durch zahlreiche Abbildungen, Übersichtstafeln, eine Sammlung von 11 Originaltexten (von Platons „Staat“ bis Storms „Schimmelreiter“), ein umfangreiches Literaturverzeichnis und ein Personenverzeichnis; nur ein Sachverzeichnis fehlt. Für ein historisches Werk ungewöhnlich sind die zahlreichen Aufgaben am Ende jedes Kapitels, zur Ergänzung und Vertiefung des Stoffes. Sie sind oft anspruchsvoll und werden dem Leser manches Kopfzerbrechen bereiten, zumal nur selten Lösungshinweise gegeben werden. Bisweilen entsteht der Eindruck, es seien Probleme, für die im Text kein Platz mehr war, in den Aufgabenteil abgeschoben wurden.

In den einzelnen Teilen machen sich die sehr unterschiedlichen Stile der beiden Autoren bemerkbar. Während die Ausführungen von Scriba durch umsichtige und zurückhaltende Formulierungen unter Auswertung der einschlägigen, auch neuesten Fachliteratur bestechen, lässt Schreiber des Öfteren seinen persönlichen Vorlieben und Interessen freien Lauf. Historische Werke interpretiert er vorzugsweise aus seiner modernen Sicht. Das ist stellenweise völlig verfehlt, etwa dort, wo er den Satz des Pythagoras in den „Elementen“ des Euklid bespricht, an anderen Stellen ist es zwar legitim, wird allerdings nicht immer hinreichend deutlich gemacht. Forschungen von Mathematikhistorikern erwähnt Schreiber, wenn überhaupt, nur am Rande.

Immerhin kommt dank der Sichtweise Schreibers ein Themenkreis ausführlich zur Geltung, den die Geometriehistoriker eher stiefmütterlich zu behandeln pflegen: Anwendungen der Geometrie in Architektur, Geodäsie, Kartografie, Kunst, Technik und Naturwissenschaft. Zur begrifflichen Beschreibung derselben prägt Schreiber den problematischen Begriff der „unbewussten Mathematik“, die sich „im intuitiven Benutzen von Be-



Medrese (Theologische Lehranstalt) Tillja-kari am Registan in Samarkand (Usbekistan). Zur reichhaltigen arabischen Ornamentik sind kaum theoretische Schriften überliefert.

griffen, Formen und Verfahren, im Wissen und Können äußert, welches nicht in Worte gekleidet ist, sondern als materielles Produkt von Technik, Handwerk und Kunst existiert“.

Die Fülle des Stoffs ist beeindruckend. Mehrere Abschnitte des vierten Kapitels gehen der Geometrie in Kulturbereichen wie Japan, China und Indien nach, Themen, welche die Mathematikhistoriker wegen ihrer großen Schwierigkeit gerne übergangen und sich damit dem Vorwurf des Eurozentrismus ausgesetzt haben. Neben den klassischen Werken der griechischen Geometrie wird auch auf weniger bekannte Themen eingegangen, wie etwa die römischen „Agrimensoren“ (Landvermesser) oder die Trigonometrie in der Renaissance.

Auf dieser Studie hat Albrecht Dürer seine geometrische Hilfskonstruktion stehen gelassen.

Ausführliche Abschnitte über die Übersetzungstätigkeit des späten Mittelalters (aus dem Arabischen und Griechischen ins Lateinische), die Geometrie im Bauhüttenwesen, Geometrie an Schulen und Universitäten, Euklid in der Renaissance und anderes ordnen die Geometrie der jeweiligen Zeit in den kulturhistorischen Kontext ein, allerdings umso weniger, je näher man der Jetztzeit kommt – da wird die Kulturgeschichte dann durch die Computer und Algorithmengeschichte verdrängt. Relativ wenig Beachtung – obwohl im Vorwort ausdrücklich angesprochen – finden im zweiten Teil philosophische Fragen.

Insgesamt handelt es um eine sehr aufschlussreiche und reichhaltige Neuerscheinung zur Geschichte der Geometrie, wenn auch die historische Aufarbeitung im zweiten Teil des Werkes noch manches zu wünschen übrig lässt. Aber das reichhaltige Material, das hier versammelt wurde, wird die Aufarbeitung dieses Defizits erleichtern.

Klaus Volkert

Der Rezensent ist Mathematikhistoriker. Er vertritt zur Zeit eine Professur am Institut für Didaktik der Mathematik der Universität Frankfurt am Main.



ARCHÄOLOGIE

Filippo Coarelli

Rom
Ein archäologischer Führer

Aus dem Italienischen von Agnes Allroggen-Bedel.
Philipp von Zabern, Mainz 2000. 283 Seiten, DM 49,80

Es gibt mehrere „Bibeln" in der archäologischen Literatur: „den Gruben" für griechische Architektur, „den Fuchs" für griechische Plastik, „den Andreae" für römische Kunst – und eben „den Coarelli", der ein akribisches Bild der Stadt Rom im Altertum zeichnet. 1974 erstmals bei Mondadori erschienen, 1975 ins Deutsche übersetzt und seither zwar alle paar Jahre nachgedruckt, aber nur selten – zuletzt 1997 – komplett überarbeitet, ist dieses Werk zum unverzichtbaren Begleiter jedes archäologisch interessierten Romreisenden geworden. Nun kommt endlich eine neue, überarbeitete deutsche Auflage auf den Markt.



Das Buch gliedert sich in drei Hauptkapitel: „Die großen öffentlichen Bauten" befassen sich mit Stadtmauern, -türmen und Aquädukten (nicht aber den ebenfalls öffentlichen Thermen, Stadien und Theatern). „Das religiöse und politische Zentrum der Stadt" beinhaltet die eigentlichen Highlights: Kapitol, Forum Romanum, Kaiser-Foren, Palatin und Kolosseum. Die Besiedelung auf den sieben Hügeln Roms, die republikanischen Fora (Platzanlagen) und der der Stadtmauer am nächsten gelegene Teil der Via Appia bilden das dritte Kapitel, „Die augusteischen Regionen" – nach der von Augustus (23 vor bis 14 nach Christus) eingeführten wegweisenden Stadteinteilung. Man wünscht sich eigentlich nur noch ein Kapitel über die stadtnahen Ausgrabungen in Ostia oder Tivoli, zwei Attraktionen, die zum Standardprogramm jedes Rombesuchers gehören.

In der umfassenden Einleitung gibt Coarelli einen Überblick über die städtebauliche Entwicklung von der republikanischen Frühzeit im 7. vorchristlichen bis zum 3. nachchristlichen Jahrhundert, als das Zentrum des römischen Reiches von Rom nach Konstantinopel verlegt wurde und die „Ewige Stadt" ihre Bedeutung verlor. Der Anhang liefert eine nützliche Kaiserliste; leider werden in der deutschen Ausgabe, anders als in älteren Auflagen, nur noch die Baumaterialien, nicht aber die Bautechniken illustriert, was deren Beschreibung unanschaulich macht.

Inhaltlich lässt sich „dem Coarelli" kaum etwas anhaben: Der große Kenner Roms legt hier profunde Sachkenntnis an den Tag, und Pläne, Grundrisse und Umzeichnungen wie jene des Frieses der Trajanssäule dienen der besseren Verständlichkeit des detailliert Beschriebenen.

Optisch aufgemöbelt wurde der neue Coarelli durch die im Computerzeitalter anscheinend unverzichtbaren Axonometrien. Zugegeben, manchmal geben sie tatsächlich eine bessere Vorstellung, doch bei der Gelegenheit hätte man einige der teilweise sehr alten und nicht immer sonderlich scharfen Fotos durch bessere Aufnahmen ersetzen können.

Ein etwa 200 Meter langes, spiralförmiges Relief auf der Trajanssäule erzählt die Geschichte der beiden Kriege Kaiser Trajans (Regierungszeit 98 – 117) gegen die Daker.

Gegen die deutsche Übersetzung ist jedoch einiges einzuwenden. Das Literaturverzeichnis endet mit dem Erscheinungsjahr 1973 (dem Stichdatum der allerersten italienischen Auflage!) und ignoriert damit wichtige und wegweisende Neuerscheinungen. Werke wie zum Beispiel „Der Titusbogen" von Michael Pfanner (Mainz 1983) und der wegweisende Ausstellungskatalog „Kaiser Augustus und die verlorene Republik" (Berlin 1988) sollten keinem Leser vorenthalten werden.

Im Register sind die Anordnungskriterien oft nicht sehr klar zu erkennen. Auch mancher Übersetzungsfehler hätte bei größerer Sorgfalt vermieden werden können. So befinden sich die Monumente unter der Überschrift „Die Via Appia innerhalb der Stadtmauer" in Wirklichkeit außerhalb derselben. Nicht zuletzt ermüdet der dreispaltige, optisch kaum gegliederte Flattersatz das Auge ziemlich rasch, zumal die Schrift recht klein und schmal ist.

Man hätte sich außerdem gewünscht, dass neueste Ausgrabungen miteinbezogen worden wären. Gerade im Zusammenhang mit dem Heiligen Jahr 2000 ist in letzter Zeit viel geschehen. Die unlängst wieder eröffnete Domus Aurea wurde zwar integriert, doch hätte ein zusätzlicher Hinweis – wohlgemerkt keine Ergebnisse, denn mit deren Publikation lassen sich Archäologen bekanntlich viel Zeit – auf die fortdauernden Ausgrabungen im Bereich der Via dei Fori Imperiali oder auf dem Foro Romano nicht geschadet.

Trotz dieser Mängel – bei dem archäologisch orientierten Verlag von Zabern etwas unverständlich – ist Filippo Coarellis archäologischer Romführer seit über 25 Jahren nicht nur ein Standardwerk, sondern ein „Reiseführer", der ins Gepäck eines jeden Rombesuchers muss – auch wenn er nach wie vor zu unhandlich für die Jackentasche ist.

Margit Brinke und Peter Kränzle

Die Rezensenten sind promovierte Klassische Archäologen; sie arbeiten als freie Buchautoren und Journalisten in Augsburg.

EINLADUNG ZUM ABONNEMENT

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

WIR MÖCHTEN AUCH IHRE FREUNDE FÜR UNS GEWINNEN

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.



ZEN GARDEN

Stress im Büro? Diese Visitenkartenbox können Sie zur Entspannung nutzen und gleichzeitig zur Aufbewahrung Ihrer Visitenkarten (Maße 20×12×10 cm)



TOURING SET –

der ideale Begleiter für lange Autofahrten. Die Isolierflasche umfasst 0,9 Liter. Die beiden Becher (0,4 Liter) sind passend für Standard-Autohalterungen und haben einen festschließenden Deckel mit Trinköffnung.



PICKNICK-RUCKSACK

Genießen Sie die ersten warmen Sonnenstrahlen bei einem Picknick zu zweit. Der praktische Rucksack enthält für zwei Personen Teller und Sektgläser aus Kunststoff sowie Besteck und Kellnermesser aus Edelstahl. Er ist mit einem Kühlfach und zwei Flaschenhaltern ausgestattet.

NUTZEN SIE DIE VORTEILE DES ABONNEMENTS:

Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis für monatlich DM 11,85 einschließlich Versand; Schüler und Studenten zahlen nur DM 10,30.

Das Postkartenbuch „Die kleine Astro-Galerie“ schenken wir Ihnen als Dank für Ihr Interesse.

Außerdem haben Sie als Abonnent freien Zugang auf unser Online Archiv. Dort liegen für Sie alle zurückliegenden Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft seit 1993 im Volltext bereit.

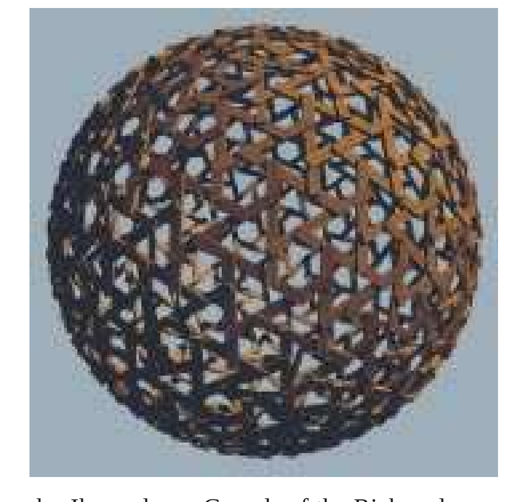


BEGINNEN SIE IHR ABONNEMENT MIT DER NÄCHSTEN AUSGABE UND SENDEN SIE NEBENSTEHENDE BESTELLKARTE AN UNS AB.

Körper mit Ecken und Kanten

Polyeder (Vielflächner, genauer: von ebenen Flächen begrenzte dreidimensionale Körper) sind dankbare Objekte der Computergrafik: hübsch anzusehen, vergleichsweise einfach zu berechnen und deshalb virtuell weitaus leichter herzustellen als in der Realität. Kein Wunder, dass die Vielfalt der Websites zum Thema „Polyeder“ unüberschaubar ist. Immerhin verweisen die Polyeder-Freunde ungewöhnlich fleißig auf die Websites Gleichgesinnter; das Web ist an dieser Stelle besonders eng geknüpft.

Vier Adressen empfehle ich Ihrer besonderen Aufmerksamkeit; deren Links bieten außerdem gute Ausgangspunkte für ausgedehnte Entdeckungsreisen im Internet. *Christoph Pöppe*



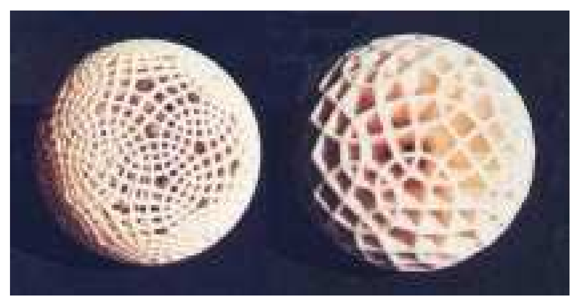
Der Objektkünstler



George Hart hat Mathematik und Informatik studiert, ein Lehrbuch über mehrdimensionale Analysis und zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten geschrieben – so weit nichts Besonderes. Aber die mehreren hundert Seiten seiner Website bieten einen enzyklopädischen Überblick über alle Arten von Polyedern, leibhaftige und virtuelle, darunter bewegliche, wenn Ihr Browser VRML-fähig ist, ein reichhaltiges, kommentiertes Literaturverzeichnis und Hunderte von Links.

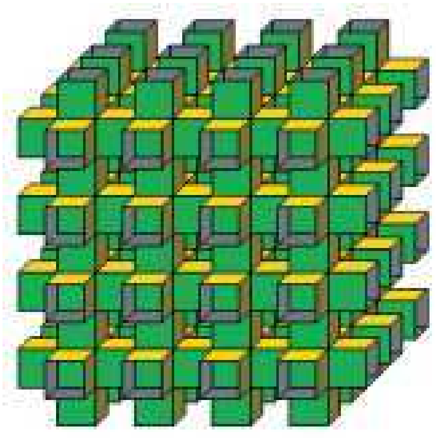
Die Zonoeder („Gürtelflächner“, die er in Händen hält, sind zwei spiegelbildlich gleiche Projektionen des neundimensionalen Einheitswürfels in den dreidimensionalen Raum. Für dreißig Disketten hat er nützliche Verwendung gefunden (unten): Geschlitzt und ineinandergesteckt, zeigen sie die Symmetrie des Ikosaeders. „Gonads of the Rich and Famous“ (rechts unten) sind Skulpturen, die er aus Polyedern weiterentwickelt und über Stereolithographie hergestellt hat. Der Lattenverhau „Nailbanger’s Nightmare“ („Schreiners Schrecken“, oben) existiert bislang nur virtuell.

www.georgehart.com





Der Softwarespezialist



Roman Mäder hat – Mathematica macht’s möglich – eine komplette Liste aller uniformen Polyeder samt Abbildungen, ihren unaussprechlichen Namen und Eigenschaften ins Netz gestellt. Ein uniformes Polyeder besteht aus – möglicherweise mehrerlei – gleichseitigen Vielecken, die entlang ganzer Kanten aneinandergrenzen müssen, aber sternförmig sein dürfen (Pentagramme sind zugelassen). Flächen dürfen einander überdecken; aber alle Ecken müssen von gleicher Art sein. Das links abgebildete uniforme Polyeder ist Nummer 31 von 75 verschiedenen und heißt „kleines Ikosikosidodekaeder“.

www.mathconsult.ch/showroom/unipoly/index.html

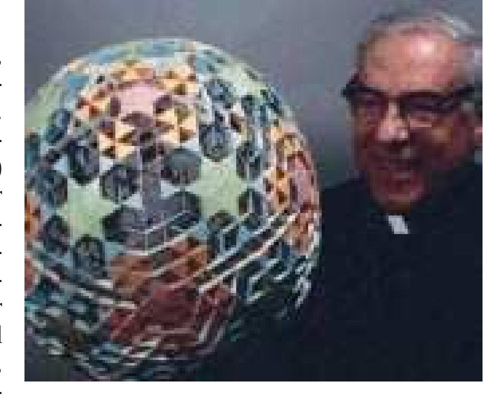
Der Theoretiker

Steven Dutch, Professor an der Universität von Wisconsin in Green Bay, liefert eine reich gegliederte Einführung in die Theorie der Polyeder.

Dieses Gebilde ist von lauter Quadraten begrenzt und hat lauter gleiche Ecken. Dass es unendlich ausgedehnt ist, widerspricht nicht der – erweiterten – Definition des Polyeders.

www.uwgb.edu/dutchs/symmetry/symmetry.htm

Der Mönch



Magnus Wenninger, Jahrgang 1919, Benediktiner in der St. John’s Abbey in Collegeville (Minnesota) und Autor klassischer Werke über Eigenbau-Polyeder („Polyhedron Models“, „Polyhedron Models for the Classroom“ und „Spherical Models“), stellt seine prachtvollen, in langwieriger Handarbeit gefertigten Polyeder mittlerweile im Web zur Schau.

www.employees.csbsju.edu/mwenninger/

Wie schnell verfliegt die Zeit?

Je älter man wird, desto schneller scheint die Zeit zu verrinnen. Aber das liegt nicht am Alter – jedenfalls nicht direkt.

Von F. Thomas Bruss und Ludger Rüschendorf

Die Zeit vergeht im Prinzip mit konstanter Geschwindigkeit: eine Sekunde pro Sekunde, was sonst? Die Physik, vor allem in Gestalt der Relativitätstheorie, scheint zwar an der Einfachheit der Zeitdefinition zu rütteln, stellt aber ihre Arithmetik nicht auf den Kopf. Unter gleichen Bedingungen des Beobachters dauern fünf Minuten fünfmal so lang wie eine Minute.

Unser Zeitgefühl scheint jedoch ein anderes zu sein. Frohe Stunden vergehen schnell, zwanzig Minuten Warten auf den Bus erscheinen lang und eine Minute Schmerz noch viel länger. Vor allem aber: Je älter man wird, desto schneller scheint die Zeit zu verrinnen. Fast jeder Mensch erlebt das so. Aber woran liegt das?

Die typische Erklärung führt das Phänomen auf das Altern zurück, insbesondere das Nachlassen der körperlichen und geistigen Kräfte. Demnach würde eine Person im fortgeschrittenen Alter, die geistig und körperlich genauso frisch wäre wie mit zwanzig Jahren, eine Zeitbeschleunigung nicht empfinden.

Wir bieten hier eine andere Erklärung an. Mit Hilfe eines einfachen mathematischen Modells zeigen wir, dass die subjektive Länge einer Zeitspanne nicht vom Lebensalter abhängt, sondern von einer sich aus dem Zeitverlauf ergebenden Gesetzmäßigkeit. Diese ist von hinreichend einfacher Struktur und erlaubt, trotz vieler unbekannter Faktoren, eine eindeutige Quantifizierung: Die Zeitausdünnung ist von logarithmischer Form.

Wir gehen von der Voraussetzung aus, dass unser Zeitgefühl im Wesentlichen proportional zur Anzahl neuer Ereignisse in unserem Leben ist. Vieles spricht für diese Hypothese. Eine berufliche Reise von drei Tagen bleibt meist besser in Erinnerung als drei Tage zu Hause oder am gewohnten Arbeitsplatz. Ein Urlaub in einem fremden Land wird selten vergessen. Wohl kaum stellt man sich die Frage: „Wo sind die drei ersten Tage?“ Vielleicht aber: „Wo sind die drei letzten?“ Es geht uns allen wahrscheinlich ähnlich. Nach drei Tagen überwiegt die Freude, dass der Löwenanteil des Urlaubs noch bevorsteht, und dann hat der Löwe auch schon bald ausgebrüllt.

In der Erinnerung dreht sich dieses Zeitgefühl um. Erfüllte Zeitstrecken erscheinen ausgedehnter als leere. Im Alter verkürzt sich die subjektive Erlebniswelt. Diese Beobachtungen zum Verständnis der subjektiven Zeitauffassung finden sich in der Literatur zur Wahrnehmungspsychologie ebenso wie im Alltagsbewusstsein, wie es etwa Thomas Mann in seinem „Zauberberg“ beschrieben hat.

Vereinfachtes Modell des Lebens

Fassen wir unser Leben als eine Folge von Ereignissen auf. Solange wir leben, ist die Länge der Folge unbekannt. Es gibt Ereignisse, auf die wir keinen Einfluss haben, andere, die wir teilweise mitbestimmen, und wieder andere, für deren Eintreten wir voll und ganz Verantwortung tragen. Wir wollen den Begriff Ereignis hier allgemein halten und nicht zwischen Ereignissen verschiedener Dauer oder Bedeutung unterscheiden.

Unsere Geburt ist ein Ereignis, das allen anderen vorangeht; aber einen Schnupfen haben, eine Strecke mit dem Auto fahren, einen Brief schreiben, diesen Artikel lesen oder sich Gedanken über den Mars machen, all dies sind Ereignisse in unserem Sinne. Einige Ereignisse werden von Mitmenschen geteilt, andere wiederum sind eher individueller Natur. Viele Ereignisse wiederholen sich in ähnlicher oder genau gleicher Weise, andere sind einmalig.

Die Idee unseres Modells besteht darin, die Zeit zu diskretisieren. Unser Leben enthält N Ereignisse, die nach individueller Definition als verschieden und bedeutungsvoll angesehen werden. N ist unbekannt, nicht zuletzt, weil wir nicht wissen, wie lange wir leben und was uns das Leben bringen wird, aber auch, weil wir vielleicht Besseres zu tun haben, als uns über die genaue Definition von „Ereignis“ den Kopf zu zerbrechen. Dies mag jeder für sich selbst entscheiden – zum Beispiel, ob das Frühstücksei von heute mitsamt dem Anruf von Frau Müller-Störmich, der den Genuss desselben beeinträchtigte, das heutige Frühstück in den Rang eines neuen Ereignisses erhebt! Diese Definitionsfreiheit macht das Modell interessant. N existiert, und ob man die Anzahl N der verschiedenen Ereignisse eines Lebens in der bescheidenen Größenordnung von einigen Hundert oder aber von Millionen sieht, ist, wie wir sehen werden, von geringer Bedeutung. Wichtig ist nur, dass jeder seiner eigenen Definition zeitlebens treu bleibt.

Denken wir uns eine große Anzahl von Kästchen, die den verschiedenen potenziellen Ereignissen unseres Lebens entsprechen. In die Kästchen werden nun Kugeln gelegt, und wir interpretieren dies als Eintreten der entsprechenden Ereignisse. Viele Kugeln werden von uns selbst gelegt, viele von Mitmenschen, andere wiederum von der Natur, vom Zufall oder von Gottes Hand, je nach philosophischer Grundauffassung. Der Ablauf des Lebens wird nun durch die Reihen-



AXEL WEIGAND

folge der Belegung beschrieben. Die Kästchen selbst brauchen nicht geordnet zu sein. Kästchen, in die mehrere Kugeln fallen, stellen wiederholte Ereignisse dar, leere Kästchen stehen für das bisher nicht Erlebte. Wir kennen N nicht, doch das N-te Kästchen, wo immer es auch stehen mag, wird am Ende genau eine Kugel erhalten. Wir wissen warum.

Wie viele Kugeln werden im Durchschnitt benötigt, bis, sagen wir, M Kästchen mindestens je eine Kugel enthalten, das heißt, M verschiedene Ereignisse stattgefunden haben? Zumindest M Kugeln, theoretisch aber unendlich viele. Die Kästchen, die für häufig wiederholte Ereignisse stehen, wie Standardessen oder Zähneputzen, werden sich rasch und mit großer Regelmäßigkeit füllen. Andere Kästchen hingegen werden lange auf ihre erste Kugel warten müssen. Da der Zufall mitspielt, wollen wir ihn modellieren.

Nehmen wir an, dass jedes Kästchen, unabhängig von der Vorgeschichte, die gleiche Wahrscheinlichkeit hat, die jeweils nächste Kugel zu empfangen. (Diese Hypothese ist nicht sehr realistisch, wenn wir an Ereignisse wie Essen oder Schlafen denken. Doch mehr hierzu später.) Dann liefert ein einfaches Argument aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, dass die erwartete Anzahl von benötigten Kugeln bis zur M-ten Neubelegung

$$1+\frac{N}{N-1}+\frac{N}{N-2}+\cdots+\frac{N}{N-M+1}$$

beträgt. Diese Zahl wird durch $A(N,M) = N \ln (N/(N–M))$ gut approximiert. Die Funktion ln bezeichnet hier den Logarithmus zur Basis e=2,71828… (Man ersetzt die Summe durch das Integral über eine Funktion, die der Reihe nach die zu summierenden Werte annimmt.) Nun kennen wir N nicht, doch ist dies interessanterweise kein Problem.

Für das Zeitgefühl zur Zeit der M-ten Neubelegung spielt nämlich nur der Vergleich zur Vergangenheit eine Rolle und nicht der Vergleich zur Zukunft, die wir nicht kennen. In dem Moment, in dem wir das M-te neue Ereignis erlebt haben, blicken wir zurück auf den Zeitpunkt, als das V-te neue Ereignis uns traf (V ist also kleiner als M). Nach demselben Argument wie oben ist die erwartete Anzahl von Kugeln bis zur V-ten Neubelegung ungefähr $A(N,V) = N \ln (N/(N–V))$. Dies ist also, bis auf zufallsbedingte Abweichungen, die Realzeit bis zum V-ten neuen Erlebnis, wenn wir jede Belegung als eine Zeiteinheit ansehen. V kann hier zwischen 1 und $M-1$ variieren, und M kann N nicht überschreiten.

Da wir die unbekannte Zahl N aus der Berechnung eliminieren wollen, führen wir die neuen Variablen $a = V/N$ und $b = M/N$ ein. Man könnte sie „relative Lebenserfahrungen“ nennen: $b = 0{,}8$ bedeutet, dass ich 80 Prozent dessen, was das Leben für mich bereit hält, schon erlebt habe. Die reale Zeit bis zum V-ten neuen ▶



Ereignis verhält sich zu der entsprechenden Zeit bis zum M-ten neuen Ereignis wie $A(N,V)$ zu $A(N,M)$. In den neuen Variablen schreibt sich dieses Verhältnis

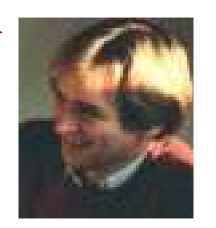
$$\frac{A(N,V)}{A(N,M)} = \frac{A(N,aN)}{A(N,bN)}$$

$$= \frac{\ln \frac{N}{N-aN}}{\ln \frac{N}{N-bN}} = \frac{\ln(1-a)}{\ln(1-b)}.$$

Diese Funktion hängt nur von a und b ab, das heißt von dem Verhältnis von V und M zu N, nicht aber von N selbst. Wir bezeichnen sie mit $f(a,b)$.

Die objektiv verstrichene Zeit ist – wieder in grober Näherung – proportional der Anzahl der gefallenen Kugeln; aber die subjektive Zeit ist proportional der Anzahl neu belegter Kästchen. Das genannte Verhältnis der beiden Zeiten ist also in der Realität gleich $f(a,b)$, in unserem Empfinden jedoch gleich a/b. Für kleine a und b, wenn wir also den größten Teil unserer Neuigkeiten noch vor uns haben, kommt unser Empfinden der Realität sehr nahe (für kleine x wird $\ln(1-x)$ sehr gut durch $-x$ approximiert). Aber für fest gewähltes b wächst diese Funktion mit wachsendem a an, und zwar stärker als proportional zu a, was der Realität entspräche: Gemessen an der subjektiven Zeit, läuft die objektive immer schneller ab. Umgekehrt kann der Kehrwert $1/f(a,b)$, wiederum für jedes feste b, als Ausdünnungsfunktion des Zeitgefühls angesehen werden.

Wenn b sehr nahe bei 1 liegt, ist das Modell nicht mehr überzeugend. Stellen wir uns vor, von allen N Kästchen sei nur noch eines leer. Das würde heißen: Die einzige Neuigkeit, die uns das Leben noch bringen kann, ist der Tod; auf den müssen wir lange warten, denn jede Kugel fällt nur mit Wahrscheinlichkeit $1/N$ in das allerletzte Kästchen, und vorher passiert nichts mehr, was wir nicht schon kennen.



F. Thomas Bruss ➤ *ist Professor für Mathematik und Statistik an der Université Libre de Bruxelles.*



◄ **Ludger Rüschendorf** *ist Professor für Mathematik und Statistik an der Universität Freiburg.*

Doch sollten wir noch keine Schlüsse ziehen, sondern zuerst unsere Hypothesen unter die Lupe nehmen.

Welchen Einfluss hat die wenig realistische Hypothese, alle N Ereignisse seien gleich wahrscheinlich? Die Mathematik gibt hierauf eine allgemein gültige und damit interessante Antwort. Für jede Teilmenge von neuen Ereignissen (noch leere Kästchen) ist die erwartete Anzahl von benötigten Kugeln zur kompletten Belegung dieser Teilmenge genau dann minimal, wenn die Ereignisse dieser Teilmenge gleich wahrscheinlich sind. Genau in diesem Fall ist also die subjektive Beschleunigung der Zeit, sprich die Abweichung von der Realität, am geringsten! Wir haben also bisher noch den günstigsten Fall betrachtet. Die Ausdünnung des Zeitgefühls könnte in Wirklichkeit viel schlimmer sein.

Bremshilfe kommt jedoch aus anderen Rädern. Wichtige Ereignisse ziehen oft viele andere neue Ereignisse nach sich. Wenn jemand gerade zum ersten Mal Vater oder Mutter geworden ist, so wird dies mit einigem Neuen verbunden sein, das heißt, das Leben wird automatisch eine Vielfalt neuer Kästchen aufstellen. Und wenn jemand eine neue Stelle angetreten hat, vielleicht sogar im Ausland, so ist der Zuwachs noch größer.

Was hält das Leben für uns bereit?

In diesen Beispielen sprechen wir plötzlich von neuen Kästchen, und das ist der springende Punkt. Das zukünftige N sollte somit nicht als konstant angesehen werden, sondern selbst als eine Funktion, die von vielen Umständen abhängen mag, insbesondere von der Veränderung von Lebenszielen und von der aktiven Ergreifung des Geschehens. Ein starkes Wachstum der Größe N führt wieder zu einer Verdichtung des Lebensgefühls. Jeder von uns persönlich aber ist es, der, mehr als jeder Andere und mehr als alles Andere, N beeinflussen kann. Dies ist eine qualitative Aussage. Die Tatsache, dass wir N kaum quantifizieren können, ist damit zweitrangig.

Nun zu der zweiten (impliziten) Hypothese. Wir haben in unserem Vergleich jede Belegung ohne weitere Erklärung mit einer Zeiteinheit gezählt, doch dauern verschiedene Ereignisse im Allgemeinen verschieden lang. Wenn wir jedoch annehmen, dass die Durchschnittsdauer eines Ereignisses gegen einen Grenzwert strebt (Gesetz der großen Zahlen), dann können wir diesen Grenzwert als eine Zeiteinheit ansehen. Die Zahlen N, M und V sind alle groß. Da es bei der Berechnung des Beschleunigungsfaktors nur auf die Verhältnisse M/N und V/N ankommt, bleibt unsere Quantifizierung im Wesentlichen richtig.

Nach unserem Modell wird also unser Zeitgefühl im Durchschnitt mindestens logarithmisch ausgedünnt. Interessant ist die Allgemeingültigkeit dieses Gesetzes. Man müsste schon ein übernervöses Leben führen, um dem Phänomen auszuweichen.

Das entdeckte Gesetz ist fast analog zu dem in der allgemeinen Wahrnehmungspsychologie fundamentalen Weber-Fechnerschen Gesetz für Sinneswahrnehmungen. Dieses besagt, dass die durch Sinnesreize ausgelöste Erregung proportional zum Logarithmus der Größe des Reizes ist. Es wurde von dem Physiologen Ernst Weber experimentell entdeckt und dann von dem Physiker Gustav Fechner aus der Annahme hergeleitet, dass die notwendige Änderung des Reizes, die zu einer gerade noch wahrnehmbaren Differenz in der Erregung führt, proportional zur Größe des anfänglichen Reizes ist. Im Vergleich zu dieser Vorstellung ist unser Modell für das Zeitempfinden abstrakter, und die Modelle sind nicht direkt vergleichbar. Die resultierende Analogie ist jedoch erstaunlich.

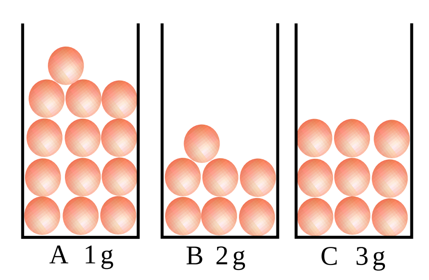
Wenn Sie also heute das Gefühl haben, dass die letzten fünf oder zehn Jahre doppelt so schnell verflogen sind wie derselbe Zeitraum vor zwanzig Jahren, so sollte Sie das nicht beängstigen. Das kann Ihnen schon im Alter von 25 Jahren passieren, wenn auch noch mit geringer Wahrscheinlichkeit. Aber, ob jünger oder älter, nichts impliziert, dass dies in den nächsten fünf oder zehn Jahren wieder so sein wird. Das Gefühl der Zeitbeschleunigung ist zuerst ein Symptom des Alltagstrotts, das Alter selbst spielt nur eine sekundäre Rolle. Wie schon festgestellt, ist das Zeitgefühl in jeder Lebensphase aktiv beeinflussbar durch Veränderung des Horizonts, durch Erweiterung oder aber auch Abschneidung von Erlebnismöglichkeiten; in unserem einfachen Modell durch die Veränderung von N.

Zum Schluss eine ganz andere Frage. Ist das Gefühl der Zeitbeschleunigung, das hier im Prinzip als unvermeidbar bestätigt wird, wirklich immer bedauernswert? Da sind wir nicht so sicher. Die folgende Definition, die vor einigen Jahren im Brüsseler „Le Soir“ zu lesen war, könnte uns allen zu denken geben:

„Das Paradies ist ein Ort, an dem alle Bewohner in aller Behaglichkeit und in alle Ewigkeit alle schönen Erinnerungen ihres Lebens austauschen. Die Hölle ist identisch, nur dass alle Bewohner leider auch ihre Dias und Videos dabeihaben.“ ■

Falsch beschriftet

von Pierre Tougne



Die 29 gleich aussehenden Kugeln haben unterschiedliche Gewichte: 1, 2 oder 3 Gramm. Sie sind nach Gewicht sortiert und in die Schachteln *A*, *B* und *C* geräumt. Leider sind alle Schachteln falsch beschriftet.

Teilen Sie die 29 Kugeln in zwei gleich schwere Häufchen.

Dazu sollten Sie, ohne die Kugeln zuvor zu wiegen, eine bestimmte Anzahl aus jeder Schachtel auswählen.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn Puzzles „Eruption". Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. Mai 2001, eingehen.

Lösung zu „Lindwürmer" (März 2001)

Auf den ersten Blick braucht man für Siggis Lindwürmer abhängig von ihrer Hals- und Schwanzzahl sehr unterschiedliche Wurmkuren. Wer ihnen mit Fallunterscheidungen ans Leder wollte, musste meist vier bis acht verschiedene Fälle unterscheiden und hatte zudem noch mit der Kategorie der unsterblichen Würmer zu kämpfen.

So lassen sich beispielsweise Lindwürmer, deren Halszahl gerade und deren Schwanzzahl ein Vielfaches von 4 ist, mit $k=3s/4+h/2$ Knoten bändigen. Warum? Siggi verknotetet einfach alle Schwänze miteinander und erhält dafür $s/2$ Hälse. Die entstehenden Hälse verknotet er wieder miteinander, was ihn zusätzliche $s/4$ Knoten kostet. Dazu kommen noch die $h/2$ Knoten für die ursprünglichen Hälse.

So findet sich für jede Wurmkategorie eine mehr oder weniger übersichtliche eigene Strategie.

Wolfgang Meier aus Bochum brachte Klarheit ins Gewürm, indem er jedem Tierchen seinen Platz in einem Koordinatensystem (der Hals-Schwanz-Ebene) zuwies: Ein Wurm mit h aktiven (das heißt unverknoteten) Hälsen und s aktiven Schwänzen kommt an die Stelle (h,s). Die vier verschiedenen Verknotungsakte K_0, K_1, K_2 und K_3, die Siggi zur Verfügung hat, entsprechen gewissen Vektoren, um die der Wurm in der Hals-Schwanz-Ebene verschoben wird.

Verknoten eines einzelnen Halses ändert im Endeffekt überhaupt nichts:

➤ $K_0=(0,0)$

Verknoten eines einzelnen Schwanzes erhöht die Gesamtzahl der Schwänze um 1:

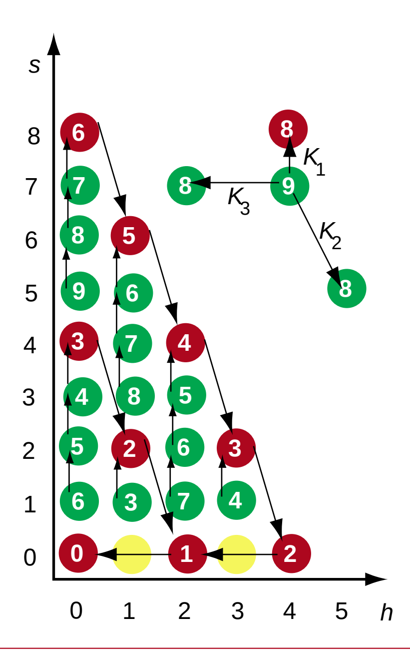
➤ $K_1=(0,1)$

Verknoten zweier Schwänze macht diese inaktiv und lässt dafür einen Hals nachwachsen:

➤ $K_2=(1,-2)$

Verknoten zweier Hälse macht nur diese inaktiv, ohne Nebenwirkungen:

➤ $K_3=(-2,0)$



Diese Verknotungsakte lassen sich in beliebiger Folge hintereinander ausführen, solange es noch Material zum Verknoten gibt. Mit dem wirkungslosen Verknoten K_0 einzelner Hälse muss Siggi sich nicht aufhalten. Es geht also darum, mit möglichst wenig Schritten der Art K_1, K_2 oder K_3 vom gegenwärtigen Zustand (h,s) in den unschädlichen Zustand (0,0) zu gelangen, wobei der gesamte Weg im rechten oberen Quadranten der Hals-Schwanz-Ebene verlaufen muss; denn negative Hälse oder Schwänze gibt es nicht.

Ein Blick in die Skizze legt die folgende Idee nahe: Man wandere mit K_2 nach rechts unten bis zur Nulllinie und dann mit K_3 zum Punkt (0,0). Das funktioniert aber nur für die rot gezeichneten Punkte des Diagramms; denn in allen anderen Fällen führt irgendwann ein Schritt über das Ziel hinaus in eine verbotene Zone.

Allen anderen Würmern muss Siggi wohl oder übel mit K_1 einen bis drei Schwänze nachwachsen lassen, bis er auf einen roten Punkt kommt, und dann verfahren wie oben.

In Formeln: Für einen roten Punkt (h,s') gilt $s'-2h=0$ mod 4, das heißt, $s-2h$ ergibt bei Division durch 4 den Rest 0. Also muss man vom Ausgangspunkt (h,s) in

➤ $k_1=3-(3+s+2h)$ mod 4

Schritten K_1 zum nächsterreichbaren roten Punkt $(h,s')= (h, s+k_1)$ wandern, von dort mit

➤ $k_2=s'/2$

Schritten K_2 zu einem schwanzlosen Wurm mit $h+s'/2$ Hälsen, den man schließlich mit

➤ $k_3=h/2+s'/4$

Zweihals-Verknotungen (K_3-Schritten) endgültig ruhigstellt. Die Zahlen in den Kreisen bezeichnen die Anzahl der Schritte bis zu diesem Zustand.

Es bleibt nur zu hoffen, dass Siggi nie einem schwanzlosen Lindwurm mit einer ungeraden Anzahl von Hälsen begegnet (gelbe Punkte). Diese harmlos aussehenden Tierchen sind nämlich unbesiegbar, weil man in nicht vorhandene Schwänze keine Knoten machen kann.

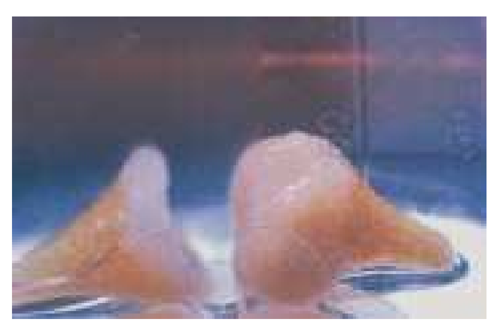
Die Gewinner der fünf Spiele „Drei gewinnt" sind Wolfgang Meier, Bochum; Jürgen Fenster, Baldham; Barbara Ahlemeyer, Marburg; Arnfried Mack, Karlsruhe; und Siegmar Dietrich, Neutraubling.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal Wissenschaft Online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik" jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

BioTissue Technologies

Neue Haut am Neuen Markt

Der Traum vom Ersatzteillager für den Menschen wird nach und nach Wirklichkeit: Ende letzten Jahres gelang es sogar, ein komplettes Fingergelenk aus körpereigenen Zellen des Patienten zu züchten und zu transplantieren. Sein Mittelfingergelenk war bei einem Arbeitsunfall zerstört worden. Gängige Praxis wäre es gewesen, ein derart geschädigtes Gelenk zu versteifen, doch dank der Entwicklungen im „Tissue Engineering" blieb dem 35-Jährigen ein solches Schicksal erspart. Heute trainiert er die Fingerbeweglichkeit und will schon bald wieder Trompete spielen. Gezüchtet wurde das Gelenk in den Labors des Freiburger Unternehmens BioTissue Technologies.



Tissue Engineering eines Fingergelenks aus Knochenzellen des Beckens und Knorpelzellen der Rippe

Aufsehen erregte BioTissue bereits mit der „Haut aus der Tube", die im September 1999 auf den Markt kam. Der körpereigene Hautersatz ruft keine Abstoßungsreaktionen hervor und wird insbesondere bei chronischen Wunden – beispielsweise Dekubitus, offenen Beinen oder diabetischem Fuß – angewendet, aber auch bei Verbrennungen, Aknenarben und Falten.

Hierzu entnimmt ein Arzt dem Patienten ambulant ein kleines Hautstück aus der Leistengegend. Daraus isoliert BioTissue Zellen der Oberhaut und kultiviert sie in einer Nährlösung unter Reinst-Raum-Bedingungen etwa 18 Tage lang. Anschließend werden die vermehrten Hautzellen zusammen mit einem heilungsfördernden Fibrin-Gel in einem speziellen Behältnis dem Arzt geschickt, der die Masse auf die saubere und desinfizierte Wunde aufträgt.

Das Besondere: Im Gegensatz zu herkömmlichen Hautzelltransplantaten wurden im Labor nicht voll entwickelte, sondern noch wenig differenzierte „Vorläufer"-Zellen der Haut gezüchtet (fachlich „Basalzellen"). Diese vermögen sich auch nach der Transplantation noch zu teilen. Da sie auch in die Tiefe wachsen und nicht nur oberflächlich auf der Wunde liegen, haftet das Transplantat gut, und die Wunde wird optimal verschlossen.

Die fertige Haut bildet sich also nicht in der Kulturflasche, sondern direkt auf der Wunde. Bereits nach zehn Tagen sind erste Hautstrukturen sichtbar, nach etwa sechs Wochen ist die Wunde abgeheilt. Bislang wurden mit dem Verfahren mehr als 150 Patienten in 30 deutschen medizinischen Zentren erfolgreich behandelt.





FOTOS: BIOTISSUE TECHNOLOGIES

Dank der „Haut aus der Tube" verheilte die Wunde (oben) nach nur sechs Wochen (unten).

Auch in der Züchtung von Knorpel kann BioTissue erste Erfolge vorweisen. In Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Freiburg und der Berliner Charité gelang es dem Unternehmen, im September 2000 das bei einem Arbeitsunfall zerfetzte Ohr eines jungen Mannes wieder herzustellen.

Zunächst nahm ein Zahnarzt einen Gipsabdruck vom verletzten Ohr, um daraus eine maßgeschneiderte Hohlform aus Silikon anzufertigen. Anschließend stanzten die Ärzte etwa zwei Gramm Knorpel aus der Rippe des Mannes. Der Rippenknorpel wurde zerkleinert, die Knorpelzellen herausgelöst und sechs Tage lang in einer Nährlösung vermehrt. Zusammen mit einem Fibrin-Gel wurden sie dann in die sterile Ohrform aus Silikon gegossen. Nach rund drei Wochen im Brutschrank war ein passgenaues Knorpelstück nachgewachsen, das erfolgreich verpflanzt werden konnte. In ähnlicher Weise gelang das erwähnte Fingergelenk, wobei hier auch Knochenzellen vermehrt wurden.

Ulrike Zechbauer

Die Autorin arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in München.

Das Unternehmen im Profil

BioTissue Technologies wurde 1997 als Spin-off des Universitätsklinikums Freiburg gegründet und startete mit drei Mitarbeitern, mittlerweile sind es 35. Das Unternehmen züchtet menschliche Gewebe aus körpereigenen Zellen. Zwei Hautersatz-Produkte sind bereits auf dem Markt – BioSeed-S zur Behandlung schlecht heilender Hautwunden und MelanoSeed zur Behandlung der Vitiligo (Weißfleckenkrankheit). Drei weitere Produkte zum Wiederaufbau von Knochen, Knorpel sowie Mundschleimhaut werden in diesem Jahr eingeführt. Vor allem die Möglichkeiten einer Arthrosebehandlung eröffnen bei allein 1,5 Millionen therapiefähigen Patienten in Deutschland ein enormes Marktpotenzial. BioTissue plant für die Zukunft auch die Herstellung kompletter Organe wie Leber oder Niere. Seit vergangenem Dezember notiert das Unternehmen am Neuen Markt in Frankfurt. Für 2001 erwartet die AG einen Umsatz von drei Millionen Mark, im vergangenen Jahr waren es rund 760000. Im Jahr 2003 will BioTissue erstmals schwarze Zahlen schreiben. Fachleute gehen allerdings davon aus, dass sich der Markt für Ersatzgewebe in zehn bis fünfzehn Jahren voll entwickelt hat.

Weitere Informationen unter www.biotissue-tec.com



Eszter Tánczos und Rainer Seubert, Vorstände von BioTissue

MedCom GmbH

Aus 2 mach 3-D

Ein gewöhnliches Ultraschallbild liefert nur flächige Schnittbilder, und die sind oft sehr schwer zu interpretieren. Der Elektrotechniker Georgios Sakas begann nach seiner Promotion über die räumliche Darstellung von Wolken in der Computergrafik einen Algorithmus zu entwickeln, der auch in drei Dimensionen visualisiert. Dafür erhielt er 1996 den Fraunhofer-Preis (Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 103).

Um daraus ein Produkt zu machen, gründete Sakas 1997 die MedCom – Gesellschaft für medizinische Bildverarbeitung mbH. Er erwarb die Lizenz an der Software und entwickelte sie für den praktischen Einsatz weiter. Das InVivo genannte Produkt lässt sich über ein Zusatzmodul mit jedem Ultraschallgerät verbinden, je nach Ausbaustufe kostet das den Facharzt 30 000 bis 50 000 Mark. Neuere Entwicklungen koppeln Ultraschallaufnahmen mit Elektrokardiogrammen und visualisieren das schlagende Herz. Die MedCom GmbH hat bereits mehrere hundert Lizenzen für 3D-Darstellungssysteme verkauft. Daher kann das Unternehmen weitere Entwicklungen und den Aufbau eines internationalen Vertriebs aus eigenen Mitteln finanzieren.



Georgios Sakas verbessert die Ultraschalldiagnose durch 3D.

Derzeit arbeiten die Entwickler von MedCom an einer mobilen Ultraschallstation. Sie nimmt 2D-Daten auf und überträgt sie – zum Beispiel per Funk – an eine Zentrale zur Weiterverarbeitung. Ein solches Gerät muss aber den speziellen Anforderungen des Kunden genügen, zum Beispiel robust gebaut sein, diese Entwicklungsarbeit kann MedCom nach Angabe des Firmenchefs nicht mehr alleine leisten. Er erwägt deshalb, einen Partner zu suchen oder diese Aktivität an die Börse zu bringen, um mit dem Erlös der Emission das nötige Wissen einzukaufen.

Hermann Englert

Der Autor ist Mitarbeiter der Teleböse.

Der Testbrief

Wie lang ein Brief unterwegs ist, messen Postdienste mit elektronischen Testbriefen. Auf den ersten Blick unterscheiden sie sich nicht von normalen Sendungen und werden deshalb von den bei der Beförderung involvierten Personen nicht besonders behandelt. Ein solches „Messgerät“ hat gewöhnliches Geschäftsbrief-Format, wiegt nur 30 Gramm und enthält doch einen Miniaturrechner mit 128 Kilobyte Speicher und zwei Knopfzellen. Flexibles Kunststoffmaterial, das sich bis zu 90 Grad biegen lässt, umgibt und schützt das System gegen die hohen mechanischen Beanspruchungen in den Sortierzentren, wo 40 000 Briefe pro Stunde durchgeschleust werden.

Auf einer nur wenige Zentimeter großen Leiterplatte befinden sich ein Mikrochip für die Datenverarbeitung und -speicherung sowie ein Beschleunigungssensor. Bewegungen seines Siliziumplättchens erzeugen über den piezoelektrischen Effekt elektrische Signale: Wird der Brief transportiert, ob per Auto, Flugzeug oder Fahrrad, so reagiert der Sensor; liegt er still im Briefkasten, so gibt er keine Signale von sich. Um die Datenfülle zu verringern, komprimiert der Mikrochip die Messdaten auf acht relevante Werte pro Minute und speichert sie zur späteren Auswertung.

Beim Empfänger werden die Daten ausgelesen und in Intensitäts-Zeit-Diagrammen dargestellt. Ein geübter Auswerter kann dann nicht nur rekonstruieren, wann der Messbrief wie lange in einem Postamt oder am Flughafen liegen blieb und dies mit den Soll-Werten vergleichen: Er kann aus den Diagrammen auch herauslesen, ob der Testbrief in einer Turboprop-maschine durchgeschüttelt wurde oder im Laderaum eines Großraumjets ruhte, ja er kann sogar erkennen, ob der Postbote ein Fahrrad benutzte oder zu Fuß ging. Und einen ausgiebigen Plausch mit den Kunden sollte sich ein Briefträger genau überlegen, denn er könnte ja einen Testbrief bei sich tragen. So hat der United States Postal Service beispielsweise durch Testbriefe festgestellt, dass sich manche Briefträger eine dreistündige Mittagspause genehmigten. Die Deutsche Post AG ermittelte, dass 95 Prozent aller Briefe innerhalb von 24 Stunden nach der Leerung des Briefkastens ihren Empfänger erreichen, fast zehn Prozent mehr als noch vor sechs Jahren.

Ulrich Eberl

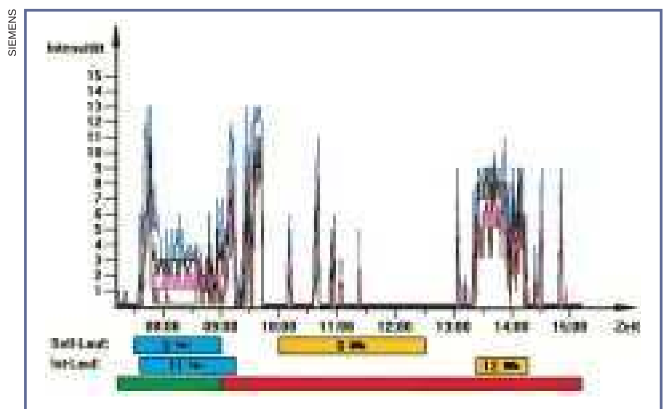
Der Autor ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in München.



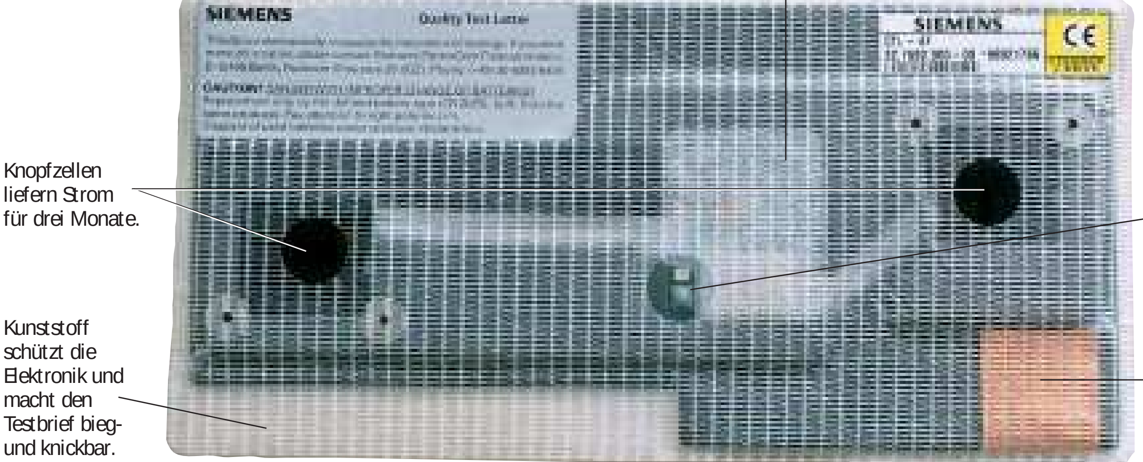
FOTOS: BURKHARD JUNGHANSS

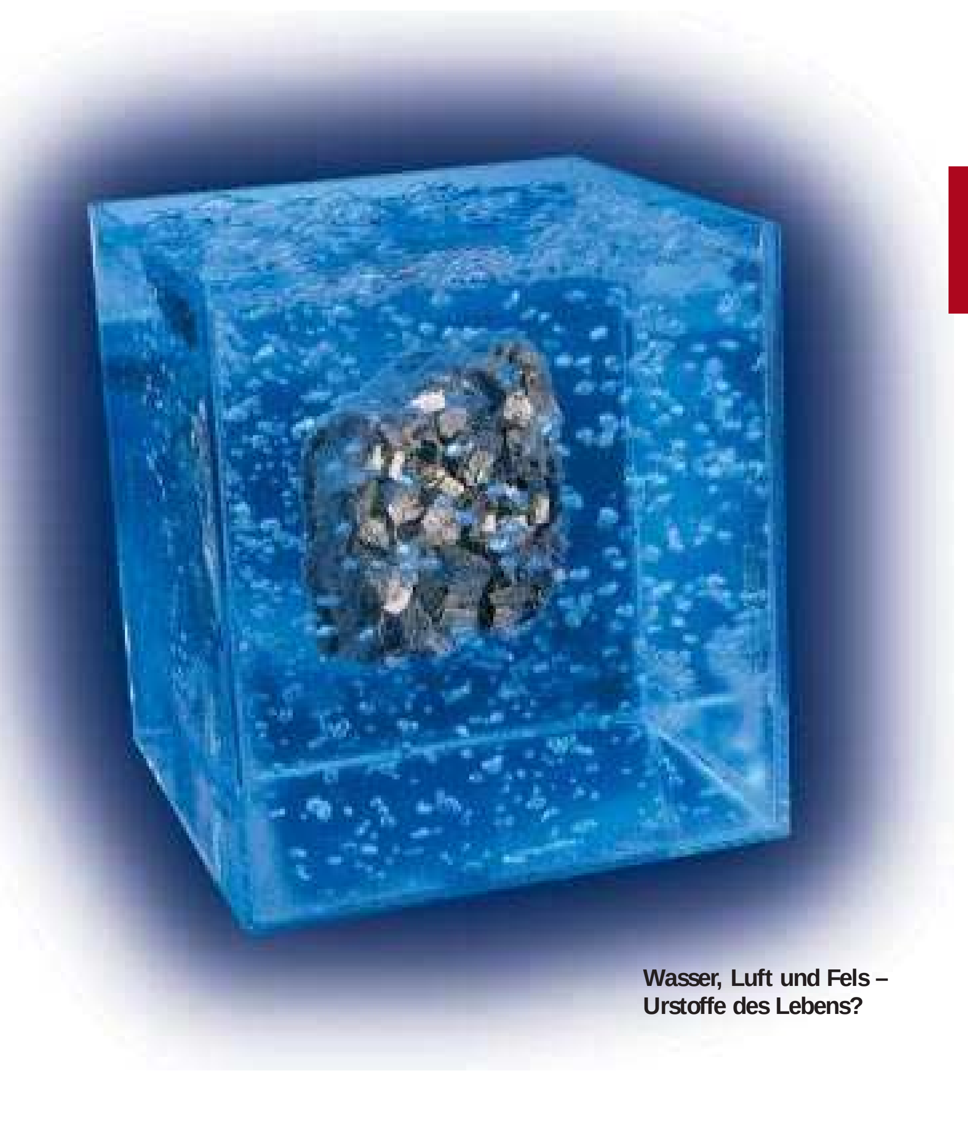
Ein elektronischer Testbrief passt genau in Umschläge für international gebräuchliche Geschäftsbriefe. Er kann aber auch problemlos in einem Päckchen oder Paket reisen. Knapp 7000 dieser Briefe zirkulieren in den Bereichen vieler Postdienste in den USA, in Südafrika und Europa.

SIEMENS



Die Intensitäts-Zeit-Diagramme der Beschleunigungswerte dokumentieren den Ablauf des Brieftransports auf wenige Sekunden genau. Im Vergleich mit den Soll-Werten zeigt sich: Das Flugzeug hatte Verspätung (blau) und die Lkw-Beförderung (gelb) fand nicht wie vorgesehen zwischen 10:00 und 12:30 Uhr statt, sondern erst um 13:30 Uhr. Da dies außerhalb der Toleranz liegt, wechselt die Anzeige des Vergleichsergebnisses von Grün auf Rot.





Wasser, Luft und Fels – Urstoffe des Lebens?

Der felsige Ursprung des Lebens

Luft, Wasser und Gestein waren die einzigen Rohstoffe für die Bildung von Leben, die auf der urtümlichen Erde zur Verfügung standen. Nach neuesten Erkenntnissen nahm das Leben seinen Anfang als Belag komplexer Moleküle auf den Mineralien der jungen Erde.

Kümmerliche Männlichkeit

Was den Mann zum Manne macht, ist nur mehr die Karikatur eines normalen Chromosoms. Aus der rekonstruierten Historie des sonderbaren Y-Chromosoms erhoffen sich Forscher neue Ansätze zur Therapie von Fruchtbarkeitsstörungen.



Indus-Archäologie: Fisch für Harappa

Während in Mesopotamien die Stadtstaaten erblühten, entstanden auch im Industal große, planmäßig angelegte Städte wie Harappa. Über Religion und Politik jener antiken Kultur wissen wir nur wenig, doch Funde von Fischknochen und Netzreste erzählen vom Alltag der Menschen.

Schärferer Blick auf Sterne

Mit einer neuen Generation optischer Teleskope, so genannter Interferometer, beobachten Astronomen Sterne mit hundertmal besserer Auflösung als mit dem Hubble-Weltraumteleskop.

Weitere Themen im Juni



Künstliche Menschen

Automaten, Frankensteins Monster, Roboter, Homunkuli: Obwohl die Fantasie versucht, über das technisch Machbare hinauszugehen, spiegelt sie die Technik ihrer Zeit wider.

Die Öffnung des Nordatlantiks

Die Trennung von Europa und Nordamerika verlief keineswegs schulbuchmäßig. So gab es mehrere Trennfugen, die im Wechsel aufrissen und sich wieder schlossen, sodass Grönland zum Spielball zwischen den beiden Kontinenten wurde. Erst jetzt enthüllen Satellitenaufnahmen den Vorgang in seiner ganzen Komplexität.